INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
CHAIRE DE PHYSICO-CHIMIE ET SCIENCE DU SOL
CENTRE DE GRIGNON

# ANNALES AGRONOMIQUES

VOLUME 21
1970

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, PARIS-7e

# ANNALES
# AGRONOMIQUES

VOLUME 21 1970 NUMÉRO 1

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, PARIS-7e

*Ann. agron.* 1970, **21** (1), 5-56.

# ÉTUDE DES EFFETS RÉSIDUELS DES CULTURES FOURRAGÈRES SUR LES CULTURES ARABLES

## II. — Effets résiduels de différents précédents sur des séquences de cultures arables

P. JACQUARD*, G. MONNIER** et L. CROISIER* (1)
avec la collaboration technique de Cl. JEANDET **

**Station d'Amélioration des Plantes fourragères, 86 - Lusignan*
***Laboratoire des Sols, Station centrale d'Agronomie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles*
*Institut national de la Recherche agronomique*

---

## RÉSUMÉ

Dans la rotation, la prairie temporaire peut modifier profondément les caractéristiques du sol, et par ce biais, les rendements. L'essai dont il est question dans cet article a comporté, après une phase préparatoire, une phase d'évaluation où furent comparées les successions (maïs, blé, avoine) et (blé, maïs, avoine).

Les six précédents étudiés sont :

1° Dactyle pur ;
2° Dactyle + Trèfle blanc ;
3° Trèfle blanc pur ;
4° Dactyle porte-graine ;
5° (Maïs, blé, orge) sans fertilisation azotée ;
6° (Maïs, blé, orge) avec fertilisation azotée ;

selon un dispositif factoriel comportant deux doses d'azote sur les cultures-tests.

Les données recueillies ont été le rendement et ses composantes, et l'aspect de la végétation. Il semble qu'il n'y ait pas de liaison entre le rendement en matière sèche des successions (blé, maïs) ou (maïs, blé) ni avec celui de la phase préparatoire, ni avec le bilan d'azote de cette phase.

Au cours des trois années d'étude des effets résiduels des différents précédents, cependant, l'azote est apparu comme la variable explicative primordiale. La quantité estimée d'azote apportée par les différentes cultures fourragères est faible. Quant à la comparaison des actions particulières de chaque précédent prairial sur les cultures-tests ne recevant pas d'azote, elle fait ressortir les excellents rendements obtenus derrière Trèfle blanc.

La nécessité de mettre en place, la même année, au moins deux cultures-tests à cycle biologique différent est un des points essentiels à faire ressortir.

---

(1) Adresse actuelle : C. N. R. A., 78-Versailles.

## I. — INTRODUCTION

Dans la rotation, la prairie temporaire peut modifier profondément les caractéristiques du sol et, par ce biais, son potentiel de production. La matière organique accumulée en quantité notable est susceptible d'agir par sa répartition, son état et son évolution ultérieure sur le niveau et la dynamique de l'azote et sur d'autres facteurs d'ordre biologique et agronomique (propriétés physiques du sol et en particulier sa structure et sa stabilité structurale). Étant donnée l'importance qu'il y a à pouvoir expliquer les effets globaux enregistrés, leur étude doit porter conjointement sur les cultures (mesure des manifestations résiduelles au travers du comportement de successions de plantes annuelles) et sur le sol (en particulier, stabilité structurale).

En préliminaire à une série d'articles consacrés à l'étude de ces effets, les problèmes posés par ce thème ont été passés en revue sous forme d'une bibliographie des travaux publiés (JACQUARD et coll., 1969), afin de situer les dispositifs mis en place à la Station d'Amélioration des Plantes fourragères de Lusignan. Des résultats relatifs aux effets de la luzerne sur des cultures de blé et de maïs ont également été donnés et commentés. L'exportation d'azote, derrière cette légumineuse, est de l'ordre, en trois ans, de 190 kilogrammes par hectare.

L'essai dont il est question dans le présent article a comporté, après *une phase préparatoire, une phase d'évaluation* sous forme de la comparaison de deux rotations : maïs + blé + avoine et blé + maïs + avoine. Ces deux phases correspondent :

1) la première, à une accumulation des effets primaires, dans des conditions comparables à celles réalisées sur une exploitation ;

2) la deuxième, à une mesure au moyen de la culture de céréales annuelles, en présence ou non de fertilisation azotée, des effets simples « précédent » et « azote » et de leur interaction, exprimés en termes de rendement biologique des appareils aériens, effets induits par des cultures fourragères de même durée, mais de nature différente. On sait, en effet, que le précédent cultural intervient fortement sur la fixation de la fumure azotée d'une culture (DEFOSSE et coll., 1968).

## II. — MATÉRIEL ET MÉTHODES (1)

### 1. *Traitements*

Lors de la phase préparatoire, les variantes culturales du tableau 1 ont été appliquées.

### 2. *Dispositif*

Factoriel : 6 précédents × 2 fertilisations des cultures-tests × 6 répétitions.

(1) Le milieu d'observation et la méthodologie générale ont été décrits par ailleurs (JACQUARD et coll., 1969, Annexes I et II).

### 3. *Fertilisation*

*a*) 100 kg/ha/an de $P_2O_5$ et $K_2O$ ;
*b*) Azote pendant la phase préparatoire (tabl. 2).

### 4. *Conduite de l'expérimentation*

Chaque culture fut établie et entretenue dans les conditions de la pratique agricole. Les variétés utilisées et les modalités d'implantation sont résumées au tableau 3.

Les conditions de mise en place, de surface parcellaire et d'exploitation des cultures, ainsi que les dimensions des surfaces prélevées en phase préparatoire ont été décrites par ailleurs et sont semblables à celles utilisées dans l'étude des effets résiduels de la luzerne (JACQUARD et coll., 1969).

Les premières opérations culturales remontent au printemps 1962.

En phase de mesure : préparations de sol, mise en place, façons d'entretien, apports d'azote ont été réalisés à des dates identiques pour ce dispositif et celui qui était destiné à apprécier les effets résiduels d'une luzernière, dans le but de comparer les résultats obtenus dans les deux cas et d'arriver ainsi à une meilleure compréhension générale des phénomènes observés.

a) *Phase préparatoire : résultats culturaux, exportations* (tabl. 4).

Les résultats concernant cette période sont résumés pour l'ensemble des récoltes et exprimés en matière sèche (M. S.) et azote (N). Le bilan en azote des traitements 3-4, comportant une légumineuse, n'est indiqué que pour mémoire, car il ne peut être tenu compte des apports par fixation d'azote atmosphérique. Deux groupes se distinguent par rapport au niveau de ce bilan :

TABLEAU I

*Traitements culturaux pendant la phase préparatoire*

| | Traitements (1) | Phase préparatoire | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 1962 | 1963 | 1964 |
| 1-2 | Dactyle pur | Exploité selon un rythme « pâture » (1re coupe : apex à 10 cm de hauteur dans la gaine) | | |
| 3-4 | Dactyle + Trèfle blanc | même exploitation | | |
| 5-6 | Trèfle blanc pur | même exploitation | | |
| 7-8 | Dactyle porte-graine | récolte de graine | | |
| 9-10 | Rotation triennale (sans azote) | Maïs | Blé | Orge |
| 11-12 | Rotation triennale (avec azote) | Maïs | Blé | Orge |

(1) Les six traitements de base comportèrent, lors de la phase d'évaluation deux sous-variantes :
— pas d'azote sur les cultures-tests (numéros impairs),
— 100 kg/ha /an d'azote sur les cultures-tests (numéros pairs), avec apports échelonnés sur le blé.
Chacune des parcelles élémentaires fut subdivisée en deux, lors de la phase d'évaluation, pour porter deux rotations de cultures annuelles (cf. infra).

TABLEAU 2

*Fertilisation azotée pendant la phase préparatoire*

| Traitements | Doses d'azote (kg/ha/an) | Répartition |
|---|---|---|
| 1-2 | 200 | 40 après chaque coupe |
| 3-4 | 100 | 40 après chaque coupe |
| 5-6 | 0 | |
| 7-8 | 150 | en 3 apports |
| 9-10 (1) | 0 | |
| 11-12 (2) | maïs 100 | en 1 apport au semis |
| | blé 100 | en 3 apports au semis |
| | orge 50 | en 1 apport au semis |

(1) Sans retour de matière organique ; donc avec exportation totale du rendement de l'appareil aérien (traitements indiqués « Sans N » dans les tableaux de rendement des cultures-tests).

(2) Avec apport de fumier avant maïs et exportation des grains seuls, donc retour au sol des pailles (traitements indiqués « Avec N»).

— le Dactyle pur et la rotation maïs + blé + orge, sans aucun retour de matière organique ni apport d'azote, dont la balance est négative,

— le Dactyle porte-graine et la rotation maïs + blé + orge, avec retour de matière organique et apport d'azote, dont la balance est positive.

TABLEAU 3

*Variétés utilisées et modalités d'implantation*

| Culture | Symboles | Nombre de plantes/m² | Densité (kg/ha) | Écartement des lignes (cm) | Variétés |
|---|---|---|---|---|---|
| Dactyle ..... | D | 750 | 15 | 19,2 | *Prairial* |
| Dactyle + Trèfle blanc | D + Tb | 375 + 375 | D = 7,5 | alternées | *Prairial* |
| | | | Tb = 2,5 | à 19,2 | *Ladino* |
| Trèfle blanc ..... | Tb | 750 | 5 | 19,2 | *Ladino* |
| Dactyle porte-graine ... | $D_g$ | 300 | 6 | 50,0 | *Prairial* |
| Maïs ..... | M | 7,5 | 20 | 70,0 | *I.N.R.A. 258* |
| Blé ..... | B | 250 | 120 | 19,2 | *Cappelle* |
| Orge ..... | O | 300 | 110 | 19,2 | *Rika* |

En *1962,* les apports d'azote avaient été les suivants :

| Traitements | kg/ha |
|---|---|
| 1-2-7-8 | 150 |
| 3-4 | 75 |
| 11-12 | 100 (plus 40 t/ha de fumier) |

Au cours de l'année d'implantation 1962, il n'y eu pas de récolte pesée sur les *plantes fourragères,* par suite d'un printemps tardif (froid) suivi d'un été très sec, ce qui ne permit que deux coupes de nettoyage. Cependant l'établissement fut très bon.

Le rendement en grain du *maïs* fut de 30 q/ha (M. S.)

TABLEAU 4

*Rendements globaux en phase préparatoire (1962-63-64)*

| Traitements | M. S. (t/ha) | | | Exportation N (kg/ha) | | | Total M. S. 1963 + 1964 (t/ha) | Exportations N (kg/ha) 1963 + 1964 | Apports N (kg/ha) 1963 + 1964 | Bilan N Apports — exportation |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1962 | 1963 | 1964 | 1962 | 1963 | 1964 | | | | |
| 1-2 D pur ..... | | 15,80 | 6,58 | | 309,48 | 135,11 | 22,38 | 444,59 | 350 | — 95 |
| 3-4 D Tb ..... | | 13,13 | 5,63 | | 301,28 | 117,51 | 18,76 | 418,79 | 175 | (— 244)? |
| 5-6 Tb pur ..... | (1) | 8,93 | 3,00 | (2) | 310,28 | 116,00 | 11,93 | 426,28 | 0 | ? |
| P.p.d.s. (0,05) ..... | | | | | NS | 17,50 | 1,26 | NS | | |
| 7-8 D g ..... | | 12,22 (3) | 7,24 (4) | | 187,92 | 78,20 | 19,46 | 266,12 | 300 | + 34 |
| | Maïs (5) | Blé (5) | Orge (5) | Maïs (5) | Blé (5) | Orge (5) | | | | |
| 9-10 cultures ..... | 6,17 | 2,34 | 4,31 | (2) | 28,66 | 40,10 | 6,65 | 68,76 | 0 | — 69 |
| 11-12 arables ..... | 6,71 | 8,28 | 7,03 | | 78,52 | 69,73 | 15,36 | 148,25 | 284 (6) | + 136 |
| P.p.d.s. (0,05) ..... | | 0,48 | 0,74 | | 6,05 | 7,83 | | | | |

(1) Pas de récolte pesée.
(2) Pas d'analyse.
(3) Deux coupes d'herbe après la récolte de graine.
(4) Une coupe d'herbe après la récolte de graine.
(5) Grain + Paille.
(6) Pour ces traitements, il y a eu, en fin 1962, enfouissement de 3,147 t/ha de M. S. (paille de maïs).
Le bilan des apports d'azote se décompose ainsi (en kg/ha) :
— *1963* sur le blé 100,
sur la paille de blé 45,
dans la paille de blé 8 (4,05 T. M. S./ha),
— *1964* sur orge 66,
sur la paille d'orge 40,
dans la paille d'orge 25 (3,96 T. M. S./ha).

En *1963*, par contre, année pluvieuse, les *rendements fourragers* furent excellents. L'association Dactyle + Trèfle blanc fut équilibrée comme le montrent les pourcentages du tableau 5, relatifs aux traitements 3 et 4, obtenus par séparation des deux constituants sur le terrain, suivie de pesée (M. V. et M. S.).

Le rendement en grain du *blé* fut normal (tabl. 6).

*L'absence de fertilisation azotée depuis 2 ans dans les traitements 9 et 10 entraînait une baisse très importante du rendement en grain et surtout en paille.*

Le rendement du *Dactyle porte-graine* (traitements 7 et 8) fut de :

| | q M. S./ha |
|---|---|
| graine | 3,52 |
| paille | 50,00 |
| herbe | 68,70 |

En *1964*, l'année fut à nouveau caractérisée par un été sec, mais à la suite d'un printemps assez favorable à la *pousse de l'herbe* (tabl. 7). Les traitements « association » présentèrent un déséquilibre comme le montre le tableau suivant :

| Exploitations | Première | Deuxième | Troisième |
|---|---|---|---|
| Date | 6-5 | 10-6 | 2-8 |
| P. 100 G | 95 | 80 | 100 |
| P. 100 L | 5 | 20 | traces |

TABLEAU 5

*Rendements fourragers*

A) Rendements en matière verte (M. V) et matière sèche (M. S) T/ha, et pourcentages de graminée et de légumineuse dans le mélange (traitements 3-4).

| | Exploitations | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1re | 2e | 3e | 4e | 5e |
| Date ..... | 6-5 | 25-6 | 30-7 | 28-8 | 18-11 |
| M. V. ..... | 10,40 | 22,08 | 4,37 | 13,70 | 14,67 |
| P. 100 G ..... | 52,05 | 61,20 | 47,00 | 66,40 | 80,85 |
| P. 100 L..... | 47,95 | 38,80 | 53,00 | 33,60 | 20,15 |
| M. S. ..... | 1,82 | 4,50 | 1,60 | 2,25 | 2,96 |
| P. 100 G ..... | 61,44 | 66,70 | 50,00 | 68,60 | 85,70 |
| P. 100 L..... | 38,56 | 33,30 | 50,00 | 31,40 | 14,50 |

B) Rendements totaux annuels en 1963 (T/ha).

| Traitements | 3-4 | 1-2 | 5-6 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| M. V. ..... | 65,22 | 75,3 | 52,9 | | |
| M. S. ..... | 13,13 | 15,80 | 8,93 | | |
| | D + Tb | D | Tb | P.p.d.s. = 1,07 | |

TABLEAU 6

*Rendements en grain du blé*

| Traitements | q M. S./ha | | Total t M. S./ha |
|---|---|---|---|
| | Grain | Paille | |
| 9-10 | 13,8 | 9,6 | 2,34 |
| 11-12 | 42,3 | 40,5 | 8,28 |
| 11-12 en % de 9-10 | 306,5 | 421,9 | 353,8 |

TABLEAU 7

*Rendements en fourrages (1964) : t M. S./ha*

| | Exploitations | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1re | 2e | 3e | Total |
| Date | 6/5 | 10/6 | 2/8 | |
| 1-2 D | 2,00 | 3,22 | 1,36 | 6,58 |
| 3-4 D + Tb | 2,10 | 2,58 | 0,95 | 5,63 |
| 5-6 Tb | 1,32 | 1,68 | 0 | 3,00 |
| P.p.d.s. | | | | 0,51 |

Cette évolution peut être attribuée autant à la sécheresse qu'à une attaque de campagnols.

En comparant ces rendements à ceux de 1963, on peut constater que, malgré les conditions du printemps, 1964 ne fut pas favorable à la production fourragère dans les conditions de Lusignan.

Le rendement de *l'orge* fut moyen (q/ha, M. S.).

| Traitements | Grain | Paille | Total (t/ha) |
|---|---|---|---|
| 9-10 | 23,3 | 19,8 | 4,31 |
| 11-12 | 31,2 | 39,6 | 7,08 |
| 11-12 en % de 9-10 | 133,3 | 200,0 | 164,2 |

Les différences entre traitements sont moins marquées que pour le blé de l'année précédente.

Le rendement du *Dactyle porte-graine* fut de 4,09 q/ha de grain (M. S.) et il ne donna lieu qu'à une seule coupe après la récolte (1,301 t/ha M. S.).

b) *Phase préparatoire : étude du sol.*

Les observations ont porté sur la stabilité structurale dans la couche labourée.

Les résultats sont exprimés sur la figure 1 en taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène.

Il s'agit là d'un test particulièrement sensible aux modifications qualitatives et quantitatives des matières organiques à l'origine des variations de stabilité structurale sous prairie, consécutives

à la remise en culture (MONNIER, 1965). Les mesures sont effectuées sur des échantillons prélevés chaque année à l'automne de façon à éviter autant que possible les variations saisonnières de stabilité. Seule la mesure initiale a été effectuée au printemps 1962 lors de l'implantation des différentes cultures de l'essai et en particulier des prairies.

Au cours de la phase préparatoire (printemps 1962, automne 1964), on assiste à une nette différenciation des trois groupes de traitements :

— les sols soumis aux rotations de cultures annuelles conduites à deux niveaux de fumure azotée conservent, malgré une légère baisse, sensiblement leur comportement initial. Si l'on prend la base 100 pour les taux Agb p. 100 initiaux, les valeurs indexées de la stabilité à l'automne 1964 sont respectivement de 87 et 91 pour les 2 régimes de nutrition azotée ;

— les agrégats des sols situés sous trois cultures à base de Dactyle bénéficient d'une légère augmentation de stabilité qui passe en valeur indexée à 112, 110 et 104 pour respectivement le Dactyle pur, le Dactyle + Trèfle blanc et le Dactyle graine ;

— seules les parcelles portant du Trèfle blanc pur voient leur comportement très sensiblement amélioré et porté à l'indice 160 par rapport au printemps 1962. C'est d'ailleurs le seul traitement *prairie* significativement différent des parcelles en cultures annuelles et même du Dactyle porte-graine, à l'issue de la phase préparatoire.

Ces résultats ne sont pas surprenants. On sait, en effet, que les prairies de Dactyle dont l'enracinement est en grande partie pérenne, n'améliorent que très peu la stabilité structurale, avant leur retournement ; un mélange Dactyle-Trèfle blanc semble à cet égard se comporter comme un Dactyle pur, tandis que le Dactyle à graine est encore moins efficace, ce qui semble devoir être rapproché de son mode d'exploitation particulier qui prolonge encore la longévité spécifique des racines de cette graminée et de l'écartement entre lignes. Le résultat le plus intéressant concerne

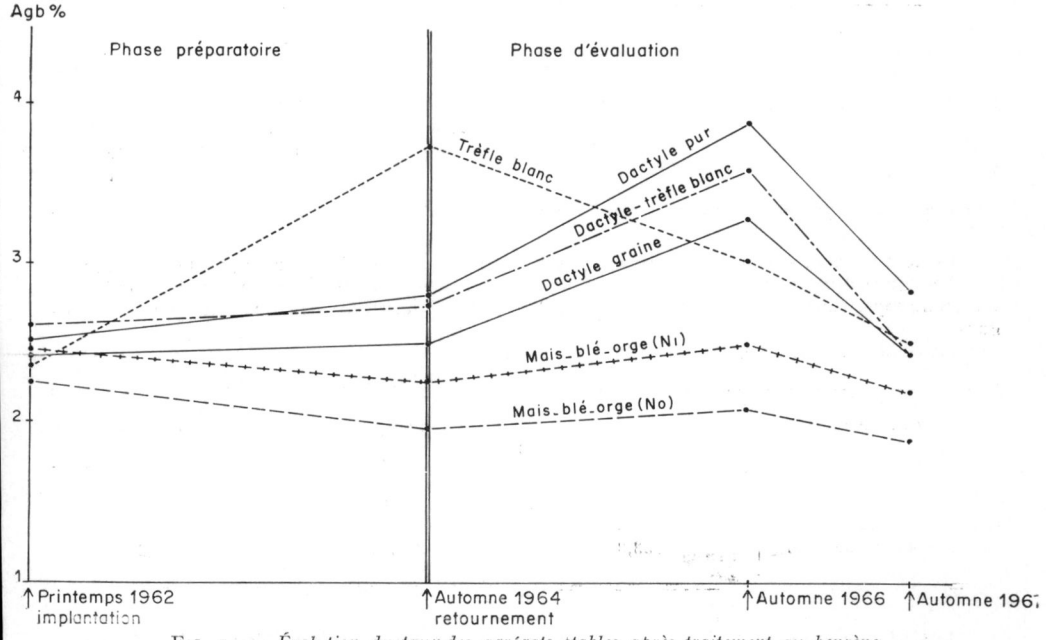



FIG. 1. — *Évolution du taux des agrégats stables après traitement au benzène.*

l'action d'une prairie de Trèfle blanc pur pour laquelle les références n'existaient pas, du moins en France. Ici également, l'enracinement annuel et fasciculé de cette légumineuse est probablement à l'origine d'une efficacité proche de celle des Fétuques, du Ray-grass anglais et de la Fléole (MONNIER, 1957). Cette interprétation est confirmée par le classement obtenu en 1964 sur les taux de matières organiques observés libres et liées (MONNIER et coll., 1962) au terme des différents traitements préparatoires (tabl. 8).

Les enrichissements varient entre 1,1 et 1,9 p. 1000 de carbone, ce qui représente de 2,2 à 4,0 p. 1000 environ de matière organique sèche, c'est-à-dire, pour 3 000 t de sol, 6,6 à 12 t/ha.

Cela correspond tout à fait à l'ordre de grandeur classique. A titre d'exemple, MONNIER a trouvé, sous une prairie de Dactyle de 3 ans, 7,5 t de matière organique supplémentaire, et 10,1 sous Ray-grass anglais. On constate, parallèlement à ce qui s'est passé pour la structure, que si tous les traitements sous prairie, excepté le Dactyle à graine, ont vu leur taux de carbone total augmenter dans des proportions comparables, seules les parcelles sous Trèfle blanc se sont enrichies principalement en matières organiques liées, tandis que sous Dactyle à graine, l'enrichissement était le plus faible en matières organiques sous les deux formes. Cette dernière constatation doit pouvoir être reliée au fait que dans le cas de graminées porte-graine, l'enracinement bien que globalement plus important que sous graminées exploitées en fourrages ou pâture, est beaucoup moins concentré dans les 20 premiers centimètres des sols sur lesquels a porté notre étude.

En définitive, au cours de la phase préparatoire, on assiste à un enrichissement en matières organiques de la couche habituellement labourée des parcelles sous prairie, par rapport à ce qui se passe dans les parcelles maintenues en cultures annuelles. Toutefois, une distinction doit être établie entre, d'une part, les parcelles sous Trèfle blanc où l'accroissement du taux de matières organiques totales porte surtout sur les formes liées et s'accompagne de ce fait d'une augmentation significative de stabilité structurale et, d'autre part, les parcelles sous Dactyle où ce sont surtout des matières organiques libres qui sont responsables de l'enrichissement constaté ; dans ce cas, la stabilité structurale n'a que peu varié au bout de deux ans et demi. Bien que la différence sensible dans la dynamique des matières organiques sous les différents groupes de traitements n'ait été rapprochée ici que des variations de comportement physique, il y a tout lieu de croire qu'elle est au moins en partie à l'origine des différences de rendements des cultures suivantes, en particulier par l'intermédiaire de l'évolution de l'azote dans le sol.

En résumé, on peut dire concernant cette phase préparatoire que si l'été sec de 1964 n'a probablement pas permis l'extériorisation du potentiel maximum de rendement des prairies, la masse de matière organique stockée dans le sol a été du même ordre que celle que l'on peut attendre normalement (tabl. 8).

TABLEAU 8

*Évolution des matières organiques totales libres et liées au cours de la phase préparatoire (1964)*

| | Maïs-Blé-Orge ($N_0$ et $N_1$) | Dactyle pur | Dactyle + T. blanc | Dactyle graine | Trèfle blanc pur |
|---|---|---|---|---|---|
| C p. 1 000 total ..... | 16,20 | 18,12 | 17,87 | 17,28 | 18,02 |
| C p. 1 000 libre ..... | 0,72 | 1,84 | 1,69 | 1,31 0 | 1,26 |
| ΔC p. 1 000 libre/témoin (M. B. O.) ..... | — | + 1,12 | + 0,97 | + 0,59 | + 0,54 |
| C p. 1 000 lié ..... | 15,48 | 16,28 | 16,18 | 15,97 | 16,76 |
| ΔC p. 1 000 lié/témoin (M. B. O.) ..... | — | + 0,80 | + 0,70 | + 0,49 | + 1,28 |
| $\frac{\Delta C \text{ p. 1 000 libre}}{\Delta C \text{ p. 1 000 lié}}$ ..... | | 1,40 | 1,39 | 1,24 | 0,42 |

De même, les conditions climatiques ont joué sur le comportement des cultures arables en introduisant une interaction « traitement × année » d'importance semblable à l'effet « traitement » (tabl. 9).

En 1964, année sèche, les différences entre niveaux de fertilité sont bien moins importantes qu'en année humide.

De telles constatations, qui peuvent rendre l'interprétation délicate, soulignent la nécessité d'une phase préparatoire de longue durée, dans ce type d'essai, si l'on veut se mettre à l'abri d'une limitation des effets à la suite d'actions écologiques défavorables. Ou bien alors, il faut avoir recours à un dispositif conçu de telle sorte que ces effets soient contrôlés ou pondérés chaque année (dispositifs répétés dans le temps du type conçu pour la mesure des effets cumulatifs). Des raisons analogues impliquent la mise en place, la même année, d'au moins deux cultures tests.

TABLEAU 9

*Rendements en M. S. (t/ha)*

| Années | Traitements | | |
|---|---|---|---|
| | 9-10 sans azote ni matière organique | 11-12 avec azote et matière organique | Effet année ($\bar{x}$) |
| 1963 (blé) ..... | 2,34 | 8,28 | 5,36 |
| 1964 (orge) ..... | 4,31 | 7,08 | 5,69 |
| Effet traitement ($\bar{x}$) ..... | 3,32 | 7,68 | |

Enfin rappelons les conclusions concernant le bilan d'azote : si l'état en fin de phase préparatoire est difficile à définir pour les traitements comportant une légumineuse, car il ne peut être tenu compte des apports par fixation, par rapport au niveau atteint, se distinguent :

— d'une part, le Dactyle pur et la succession sans retour de matière organique ni apport d'azote, dont la balance est négative,

— d'autre part, le Dactyle porte-graine et la succession avec matière organique et azote, à balance positive.

c) *Phase d'évaluation*

Chaque précédent défini ci-dessus fut testé dans les conditions expérimentales du tableau 10, les traitements pairs recevant de l'azote : 100 kg/ha pour le blé et le maïs, 0 kg/ha pour l'avoine.

Le mode d'application de la fertilisation figure dans le calendrier cultural de l'Annexe I.

TABLEAU 10

*Description du protocole de la phase d'évaluation*

| Rotation par demi-parcelle | Maïs | Blé | Avoine |
|---|---|---|---|
| | Blé | Maïs | Avoine |

Chacune de ces cultures fut implantée et conduite dans des conditions de grande culture, en particulier avec le même matériel agricole (tabl. 11).

TABLEAU 11

*Modalités d'implantation et variétés*

| Culture | Symbole | Variétés | Nombre de plantes/m² | Écartement entre lignes (cm) |
|---|---|---|---|---|
| Maïs ..... | M | *I. N. R. A. 260* | 7,5 | 75 |
| Blé ..... | B | *Cappelle* | 250 | 19,2 |
| Avoine ..... | A | *Condor* | 300 | 19,2 |

Par suite de l'incidence sur les cultures fourragères des deux causes de dégradation déjà signalées (sécheresse, campagnols) et de la nécessité d'obtenir une terre « tassée » pour le semis du blé, les façons culturales de *retournement* furent appliquées tôt en saison, comme indiqué sur le *calendrier cultural* (Annexe I). Dans ce calendrier ne figurent que les principales interventions pouvant avoir une relation directe avec la minéralisation de l'azote du sol.

Il faut rappeler, enfin, qu'au cours de ces trois années, toutes les parties aériennes ont été enlevées et qu'il n'y a donc eu aucun retour de matière organique, excepté par les racines, sur l'ensemble de l'essai, ceci afin d'éviter, dans la mesure du possible, la manifestation d'interactions trop complexes.

## III. — RÉSULTATS

### A. — Évolution du sol

Nous avons précédemment indiqué (Jacquard et coll., 1969) que le maintien du sol sous culture fourragère était susceptible de provoquer un accroissement du taux des matières organiques présentes sous forme libre (racines vivantes ou en début de dégradation) et sous forme liée, substances provenant de la transformation des racines et accumulation relative d'humus dont la minéralisation semble ralentie en conditions de non travail du sol.

Parallèlement à cette évolution et en relation avec elle, deux types de processus concernant l'état structural du sol peuvent intervenir : dans un premier temps, lorsque la texture du sol s'y prête et que les conditions climatiques et culturales sont favorables (Bui Huu Tri, 1968), on observe la « granulation » caractéristique des couches superficielles, riches en racines fonctionnelles des sols sous prairie. Ultérieurement et en fonction de la liaison aux particules minérales de matières organiques liées de néoformation, on note un accroissement de la stabilité structurale, c'est-à-dire de la résistance des agglomérats terreux à la dégradation par l'eau (Monnier, 1965).

C'est cette évolution structurale considérée dans son ensemble qui est susceptible de modifier dans un sens favorable les conditions de croissance dans lesquelles se trouvent placées les cultures installées derrière prairie temporaire.

La texture limoneuse du sol de Lusignan sur lequel est installé l'essai étudié ici, interdisant l'apparition d'une granulation caractérisée (Bui Huu Tri, 1969), nous nous sommes attachés à rechercher l'évolution de la stabilité structurale au cours des premières années suivant la remise en cultures annuelles. Cette évolution des parcelles précédemment sous prairie figure sur la figure n° 1 entre les abscisses automne 1964, date du retournement des prairies et automne 1967. Bien que les mesures correspondant à l'année 1965 n'aient pu être réalisées, il apparaît clairement que les trois groupes de traitements, dont nous avions pu distinguer le comportement au cours de la phase préparatoire, présentent également une évolution différente au cours des 3 années qui suivent le retournement.

En effet, si dans un premier temps, nous ne considérons que les précédents différents, nous pouvons faire les constatations suivantes :

— les parcelles ayant porté des cultures annuelles conservent leur comportement initial déjà pratiquement inchangé entre 1962 et 1964. Les deux niveaux d'azote continuent de se distinguer ; la stabilité des agrégats, indexée sur la base 100 en 1962 s'y situe, en 1967, à 84 et 91, respectivement, pour les parcelles n'ayant pas ou ayant reçu de l'azote entre 1962 et 1964 ;

— les parcelles ayant porté une prairie de Trèfle blanc voient au cours des 3 ans suivant le retournement, leur stabilité structurale diminuer régulièrement et de façon très sensible de telle sorte qu'en 1966, elles sont retombées à l'indice 130 puis 106 en 1967 contre 160 en 1964 au moment de leur retournement ;

— quant aux trois traitements comportant des parcelles sous Dactyle, leur évolution s'effectue en deux étapes que l'absence de prélèvements en 1965 nous interdit de dater avec certitude — à partir de 1964, la stabilité augmente pour atteindre en 1966 et sur la base 100 en 1962, les valeurs suivantes : 156, 138 et 137 pour, respectivement, les sols sous Dactyle pur-prairie, Dactyle-Trèfle blanc et Dactyle graine. Dans une deuxième étape, la stabilité diminue pour retomber à des valeurs voisines de celles de 1964.

Ces résultats sont également en accord avec ceux qui ont déjà été présentés (MONNIER, 1965). L'amélioration de stabilité structurale par un enracinement de Dactyle ne se manifeste de façon sensible qu'après le retournement de la prairie et cela pendant la période où les racines se décomposent. Par contre, dans le cas de prairies à racines en majorité annuelles (Trèfle blanc), le gain de stabilité acquis sous prairie diminue aussitôt après le retournement.

Le tableau 12 qui rassemble les données concernant l'évolution de la matière organique de 1964 à 1966 met en évidence l'influence de celle-ci sur la première étape 1964-1966 de la variation de stabilité consécutive à la remise en culture.

TABLEAU 12

*Évolution des matières organiques de 1964 à 1966*

Indice 100 pour chaque traitement en 1964

| | Maïs Blé Orge ($N_0$ et $N_1$) | Dactyle pur | Dactyle Trèfle blanc | Dactyle graine | Trèfle blanc pur |
|---|---|---|---|---|---|
| C ‰ total 1964 | 16,20 (100) | 18,12 (100) | 17,87 (100) | 17,28 (100) | 18,02 (100) |
| C ‰ total 1966 | 16,22 (100) | 17,86 (98) | 17,72 (99) | 16,95 (98) | 17,08 (94) |

Seules, en effet, les parcelles ayant porté du Trèfle blanc accusent une baisse significative de leur taux de carbone total entre 1964 et 1966.

Enfin, au bout de 3 ans, aucune différence significative de stabilité des agrégats ne persiste entre les différents traitements principaux, bien que les parcelles ayant porté une prairie, quelle qu'elle soit, aient tendance à présenter une stabilité légèrement supérieure.

Pour ce qui est des traitements secondaires : niveaux de fumure azotée et ordre des cultures dans la phase d'évaluation, les différents graphiques rassemblés sous la figure 2 montrent qu'ils n'ont eu aucune influence sur l'évolution du sol.

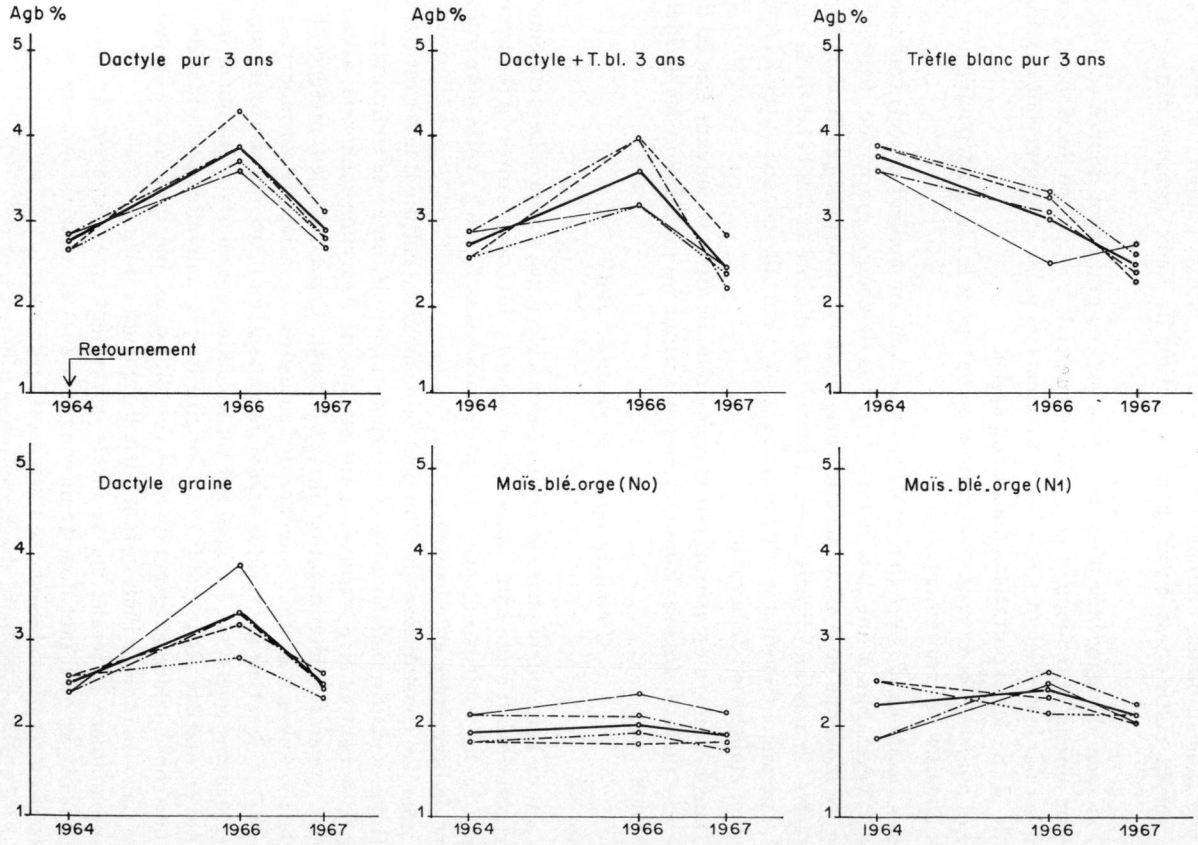



FIG. 2. — *Influence de la fumure azotée et de l'ordre des cultures sur l'évolution du sol.*

——————— Maïs $N_0$, blé, avoine

—·—·—·—·— Blé $N_0$, maïs, avoine

– – – – – – Moyenne générale

——— Maïs $N_1$, blé, avoine

···—···—··· Blé $N_1$, maïs, avoine

## B. — Rendement des cultures tests

Pour chaque culture, nous envisageons successivement : les rendements, leurs composantes, les notations d'aspects et en tirerons quelques conclusions particulières (chaque tableau donne l'interaction précédent × azote, l'apport ou non de cet élément sur la culture-test entraînant l'obtention de deux groupes distincts de données).

1) Par souci d'homogénéisation, les *rendements* en grain sont donnés en q/ha de M. S. (Pour obtenir le rendement en grain commercial, à 85 p. 100 de M. S., il suffit de multiplier par le coefficient 1,17). Les rendements en paille et totaux sont exprimés en t/ha de M. S., les exportations d'azote en kg/ha.

2) Les *composantes du rendement* correspondent, pour le blé, au dépouillement de 6 mètres linéaires par traitement.

3) Les *notations d'aspect* (0 à 5 ; 5 correspondant au meilleur aspect) traduisent l'état de la végétation à une date donnée. Au bas de chaque graphique, figurent la température moyenne et la pluviométrie entre deux observations, ces deux facteurs pouvant être en relation directe avec la fourniture d'azote et /ou l'état de la végétation. La première mensuration de hauteur sur blé a été faite chaque année à l'épiaison (premier épillet sorti de la gaine).

4) Dans la suite, il est parfois fait état *de notations diverses* pouvant être en liaison avec une mesure réalisée. Elles concernent surtout les maladies et les accidents de végétation.

### *Première année de mesure : 1965*

*Culture de blé.*

Il s'agit de la première phase de la succession « blé, maïs, avoine ». Les rendements et les exportations d'azote sont donnés au tableau 13, les composantes du rendement au tableau 14, les notations d'aspect de la végétation à la figure 3 ; cette note intègre la couleur, la luxuriance et la hauteur.

La première constatation que l'on peut faire sur cette culture d'hiver est que les quatre traitements correspondant à la rotation « maïs, blé, orge » se comportent très mal. La cause peut en être attribuée à une attaque de *Fusarium culmorum*, associé à *Ophiobolus graminis* (détermination du 28-7-1965). Cependant, en présence d'un apport de 100 unités d'azote, l'influence des parasites sur la récolte est moins accentuée ; de même, le retour des résidus organiques au sol, en phase préparatoire, semble agir dans le même sens. Ceci est aussi net sur le rendement en grain que sur le rendement total en matière sèche (tabl. 13). L'origine de ces mauvaises performances est, en fait, une conséquence indirecte de la succession « maïs, blé, orge », dans laquelle la troisième paille manifeste l'infestation pathologique du milieu.

D'une manière générale, ces résultats confirment que l'orge est un mauvais précédent à blé, et qu'il faut donc tenir compte, dans cet essai, du fait que la phase préparatoire en rotation classique se trouve ainsi pénalisée.

Pour les autres précédents, deux groupes se différencient :

1. l'ensemble des traitements « sans azote », où, quel que soit le précédent, les rendements sont semblables, sauf derrière Trèfle blanc (traitement 5). Derrière légumineuse, les quantités de grain et de paille produites sont nettement supérieures à celles obtenues avec les autres traitements, ce qui conduit à penser à une meilleure

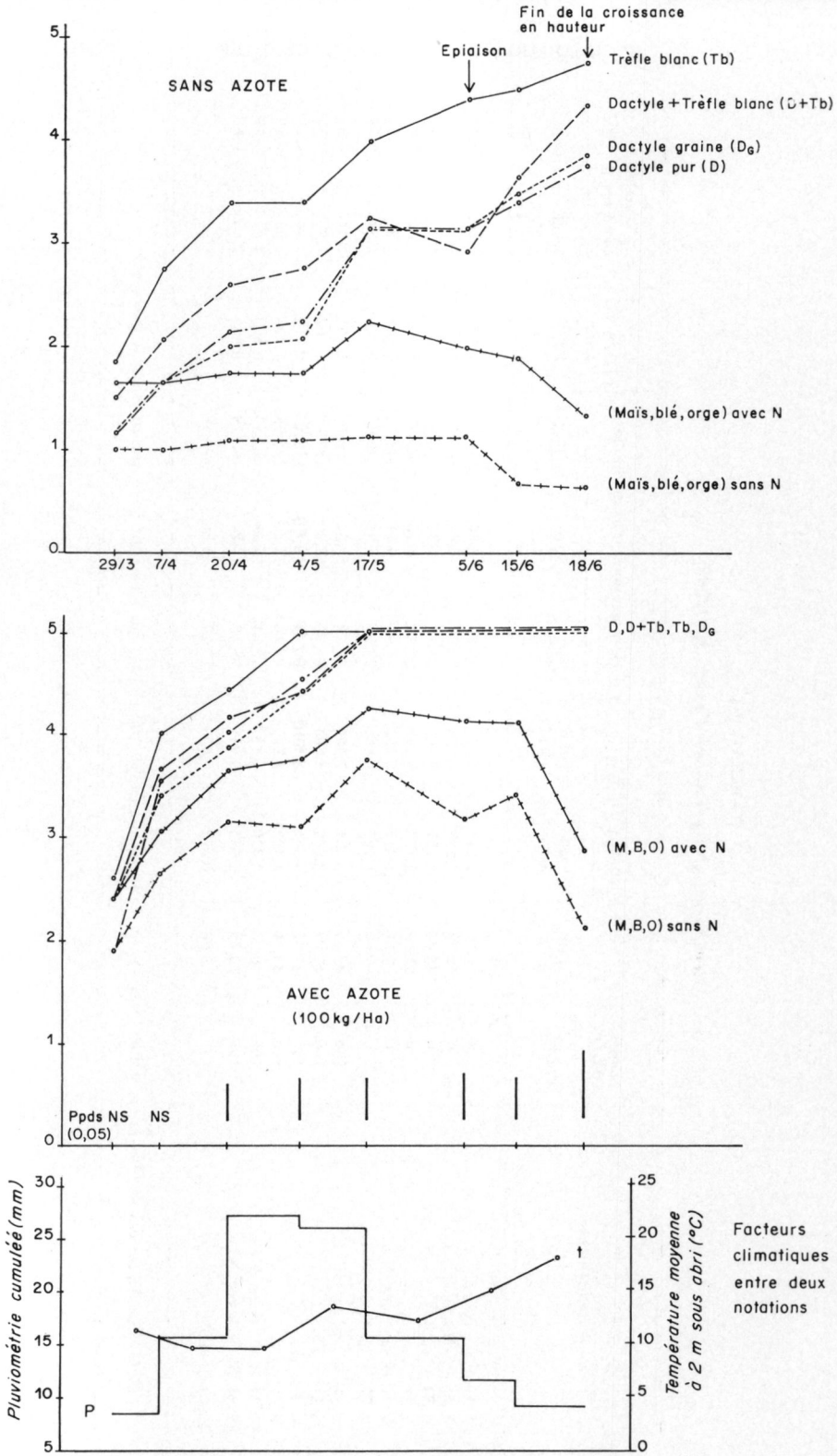



FIG. 3. — *Notation d'aspect de la végétation : blé (1965).*

TABLEAU 13

*Rendements et exportations d'azote : blé (1965)*

| Traitements | Doses d'azote sur le blé (kg/ha) | Rendements M. S. | | | Exportations d'azote kg/ha | | | Rapport grain / paille | Teneurs en azote en p. 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Grain q/ha | Paille t/ha | Total t/ha | Grain | Paille | Total | | Grain | Paille |
| 1 D | 0 | 31,39 | 2,246 | 5,385 | 55,92 | 8,80 | 64,72 | 1,397 | 1,78 | 0,39 |
| 3 D + Tb | 0 | 32,39 | 2,287 | 5,526 | 58,07 | 6,89 | 64,96 | 1,416 | 1,79 | 0,30 |
| 5 Tb | 0 | *40,45* | 3,757 | *7,802* | *78,16* | 17,37 | 95,53 | 1,076 | 1,93 | 0,46 |
| 7 D | 0 | 31,16 | 2,152 | 5,268 | 57,11 | 8,43 | 65,54 | 1,447 | 1,83 | 0,39 |
| 9 M. B. O. (sans N) | 0 | 7,41 | 1,311 | 2,052 | 13,85 | 8,41 | 22,26 | 0,565 | 1,87 | 0,64 |
| 11 M. B. O. (avec N) | 0 | 14,64 | 1,787 | 3,251 | 27,70 | 11,31 | 39,01 | 0,819 | 1,89 | 0,63 |
| 2 D | 100 | *42,39* | 3,651 | *7,890* | *85,22* | 13,56 | 98,78 | 1,161 | 2,01 | 0,37 |
| 4 D + Tb | 100 | *43,04* | 3,904 | *8,208* | *85,23* | 15,29 | *100,52* | 1,102 | 1,98 | 0,39 |
| 6 Tb | 100 | *41,51* | *4,539* | **8,690** | **90,49** | **19,60** | **110,09** | 0,914 | 2,18 | 0,43 |
| 8 $D_g$ | 100 | *43,10* | 3,763 | *8,073* | *88,43* | *18,53* | *106,96* | 1,145 | 2,05 | 0,49 |
| 10 M. B. O. (sans N) | 100 | 20,87 | 2,310 | 4,397 | 42,65 | 10,68 | 53,33 | 0,903 | 2,04 | 0,46 |
| 12 M. B. O. (avec N) | 100 | 23,69 | 2,675 | 5,044 | 48,55 | 16,94 | 65,49 | 0,885 | 2,05 | 0,63 |
| P.p.d.s. (0,05) | | 5,06 | 0,412 | 0,830 | 17,10 | 1,88 | 10,48 | | | |

Note : Le traitement de tête est en chiffres gras, et, en chiffres italiques, les traitements qui n'en sont pas significativement différents.

TABLEAU 14

*Composantes du rendement : blé (1965)*

| Traitements | Doses d'azote sur le blé (kg/ha) | Nombre (par mètre linéaire) | | | Nombre d'épis/talles | Nombre de grains par épis | Poids de 1 000 grains (g) | Échaudage (1) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Plantes levées | Total de talles | Total d'épis | | | | |
| 1 D | 0 | 42,1 | 129,3 | 44,0 | 0,34 | 27,9 | 55,691 | 4,92 |
| 3 D + Tb | 0 | 43,8 | 136,7 | 48,1 | 0,35 | 27,8 | 56,293 | 4,92 |
| 5 Tb | 0 | 48,3 | 168,5 | 62,2 | 0,37 | 27,7 | 57,165 | 4,25 |
| 7 $D_g$ | 0 | 43,0 | 133,6 | 50,3 | 0,37 | 28,2 | 56,738 | 4,83 |
| 2 D | 100 | 39,1 | 154,6 | 73,6 | 0,48 | 26,5 | 52,053 | 3,75 |
| 4 D + Tb | 100 | 44,0 | 172,7 | 82,5 | 0,47 | 27,3 | 51,226 | 3,92 |
| 6 Tb | 100 | 44,1 | 167,4 | 78,0 | 0,46 | 22,4 | 51,406 | 3,50 |
| 8 $D_g$ | 100 | 42,1 | 150,7 | 69,0 | 0,46 | 28,4 | 51,481 | 3,50 |
| 9 M. B. O. (sans N) | 0 | 48,2 | 92,6 | 12,6 | 0,14 | 11,4 | 42,260 | 3,08 |
| 10 M. B. O. (avecN) | 0 | 44,2 | 98,5 | 29,0 | 0,30 | 19,8 | 39,920 | 3,50 |
| 11 M. B. O. (sans N) | 100 | 48,0 | 118,3 | 47,3 | 0,40 | 23,4 | 43,100 | 3,50 |
| 12 M. B. O. (avec N) | 100 | 47,3 | 135,4 | 54,1 | 0,40 | 28,1 | 43,340 | 3,25 |
| Signification P = 0,05 | | NS | 100 > 0 (2) | 100 > 0 (2) | | NS (2) | 0 > 100 (2) | 0 > 100 |

(1) Noté de 0 à 5 (5 = non échaudé)
(2) Compte non tenu, dans l'analyse, des traitements 9 à 12.

alimentation azotée. D'ailleurs, dans le tableau 14, on peut remarquer que le Tt 5 présente un nombre d'épis par mètre linéaire presque comparable au dernier des traitements ayant reçu 100 unités d'azote. Ceci tendrait à montrer que l'azote laissé par le Trèfle blanc était facilement utilisable, ce qui contraste avec la « faim » de cet élément montrée par les autres blés de ce premier groupe, n'ayant pas reçu d'azote durant la période où la minéralisation est stoppée. Les notes d'aspect (fig. 3) vont dans le même sens et montrent que les différences futures de rendement se manifestent très tôt en végétation, ce qui confirme d'autres résultats récents (F. VRKOC et coll., 1969).

2. l'ensemble des traitements « avec azote », dans lequel les différences entre précédents sont fort peu marquées, pour toutes les mesures réalisées. Ceci confirme qu'une alimentation « artificielle » régularise notablement les rendements. On remarquera que, derrière Trèfle blanc (Tt 6), les cent unités d'azote ne font qu'augmenter la production de paille. De même, la teneur en azote du grain est ici la plus forte.

Le rendement d'un blé d'hiver dépend surtout du nombre d'épis à l'unité de surface. Le tableau 13 montre qu'il en est bien ainsi dans cette expérience et que les phénomènes de compensation possibles n'ont, soit pas joué (nombre de grains par épis), soit agi dans une trop faible mesure (poids de 1 000 grains), pour contrebalancer le handicap de départ que constituait l'absence d'azote facilement minéralisable. L'influence du précédent est très nette sur le tallage (nombre total de talles) et supérieure à celle de l'azote des engrais :

| | Nombre total de talles | | $\bar{x}$ |
|---|---|---|---|
| | $N_0$ | $N_{100}$ | |
| D | 129,3 | 154,6 | 141,9 |
| D + Tb | 136,7 | 172,7 | 154,7 |
| Tb | 168,5 | 167,4 | 168,0 |
| $D_g$ | 133,6 | 150,7 | 142,1 |
| $\bar{x}$ | 142,0 | 161,4 | |

TABLEAU 15

*Comparaison des mensurations (cm)*

| | Précédents | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dose de N sur le blé (kg/ha) | D | D + Tb | Tb | Dg | M. B. O. sans N | M. B. O. avec N | $\bar{x}$ |
| Hauteur à la récolte | 0 | 98,7 | 09,9 | 106,1 | 98,3 | 55,0 | 88,1 | 100,7 |
| | 100 | 109,6 | 109,9 | 106,9 | 108,3 | 93,3 | 100,8 | 108,7 |
| Croissance (1) | 0 | 21,2 | 19,6 | 17,4 | 21,5 | 1,7 | 19,1 | 19,9 |
| | 100 | 15,9 | 15,1 | 13,9 | 16,0 | 16,1 | 14,0 | 15,2 |

(1) Hauteur définitive — hauteur à l'épiaison.

Dans le tableau 15, les effets sont exprimés au moyen d'une comparaison de mensurations. La hauteur définitive dans le groupe « sans azote » est plus faible que dans l'autre groupe, sauf après Trèfle blanc, ce précédent permettant au blé d'atteindre la même hauteur que dans le traitement 6. Dans le groupe « avec azote », on peut penser que la croissance a été plus régulière, alors que l'absence de fertilisation azotée dans les traitements 1, 3, 5, 7, 9, 11, a rendu la croissance tributaire de la minéralisation de la matière organique, ce qui va de pair avec l'importance de l'élongation entre l'épiaison et la récolte.

En définitive, si le nombre d'épis par unité de surface représente bien la variable explicative majeure du rendement, on peut penser qu'elle est une manifestation de la carence en azote à laquelle furent exposés les blés durant la période de fin d'hiver — début de printemps, en l'absence d'apport en cet élément. Le bon comportement obtenu derrière Trèfle blanc (traitements 5 et 6) est attribuable à la nature de ce précédent, mais peut-être aussi à la disparition précoce de la légumineuse au cours de l'été 1964 (ce qui aurait pu permettre une minéralisation partielle avant l'hiver, suivie d'un stockage de l'azote sous forme facilement utilisable). Par contre, les autres précédents prairiaux, retournés en pleine croissance, n'ont probablement pas subi de minéralisation pré-hivernale et le phénomène ne s'est déclenché que très tard au printemps (se manifestant uniquement sur le poids de 1 000 grains). La texture des grains était d'ailleurs différente dans les deux groupes : farineuse, typique des blés tendres en l'absence d'azote, et cornée, se rapprochant de celle des blés durs en présence d'apports.

*Culture de maïs.*

Il s'agit de la première phase de la succession « maïs, blé, avoine » (tabl. 16 et 17, fig. 4). Cette première culture, de type estival, fournit des résultats assez différents de celle de blé. Si l'on compare sa réponse à l'azote, tous traitements précédents confondus, on constate un effet des cent unités de l'engrais manifesté seulement par une récolte supplémentaire de 1,672 t/ha de M. S. (0, 852 de grain + 0,215 de rafles + 0,605 de paille), la différence étant significative à une probabilité inférieure à 0,05. Dans les deux groupes, la réaction aux précédents est presque identique. L'observation des rendements (tabl. 16) conduit à attribuer le meilleur effet à l'association (traitements 3 et 4), dans les deux groupes. Vient ensuite le Trèfle blanc (traitement 5 et 6) supérieur aux deux Dactyles purs. Les deux successions arables se comportent relativement bien. On remarquera que le traitement 9, sans retour de matière organique, ni fertilisation azotée depuis quatre ans, se situe à un niveau assez élevé.

Les notations d'aspect (fig. 4) moins précises sur une plante allogame, que sur une autogame comme le blé, montrent néanmoins qu'à partir du 12-7, une différence se manifeste entre les deux groupes et persiste jusqu'à la récolte, à l'intérieur de chacun d'eux. On observe pour le groupe « *azote O* », une progression des notes jusqu'au 21-7, suivie d'une régression et d'un palier, ce qui semble être en relation directe avec la floraison notée ici le 21-7, et probablement correspondre à une demande en azote plus intense, lors de la formation du grain.

Dans le deuxième groupe, *azote 100*, la progression des notes est continue, sauf derrière maïs-blé-orge sans azote (traitement 10) et surtout derrière dactyle pur

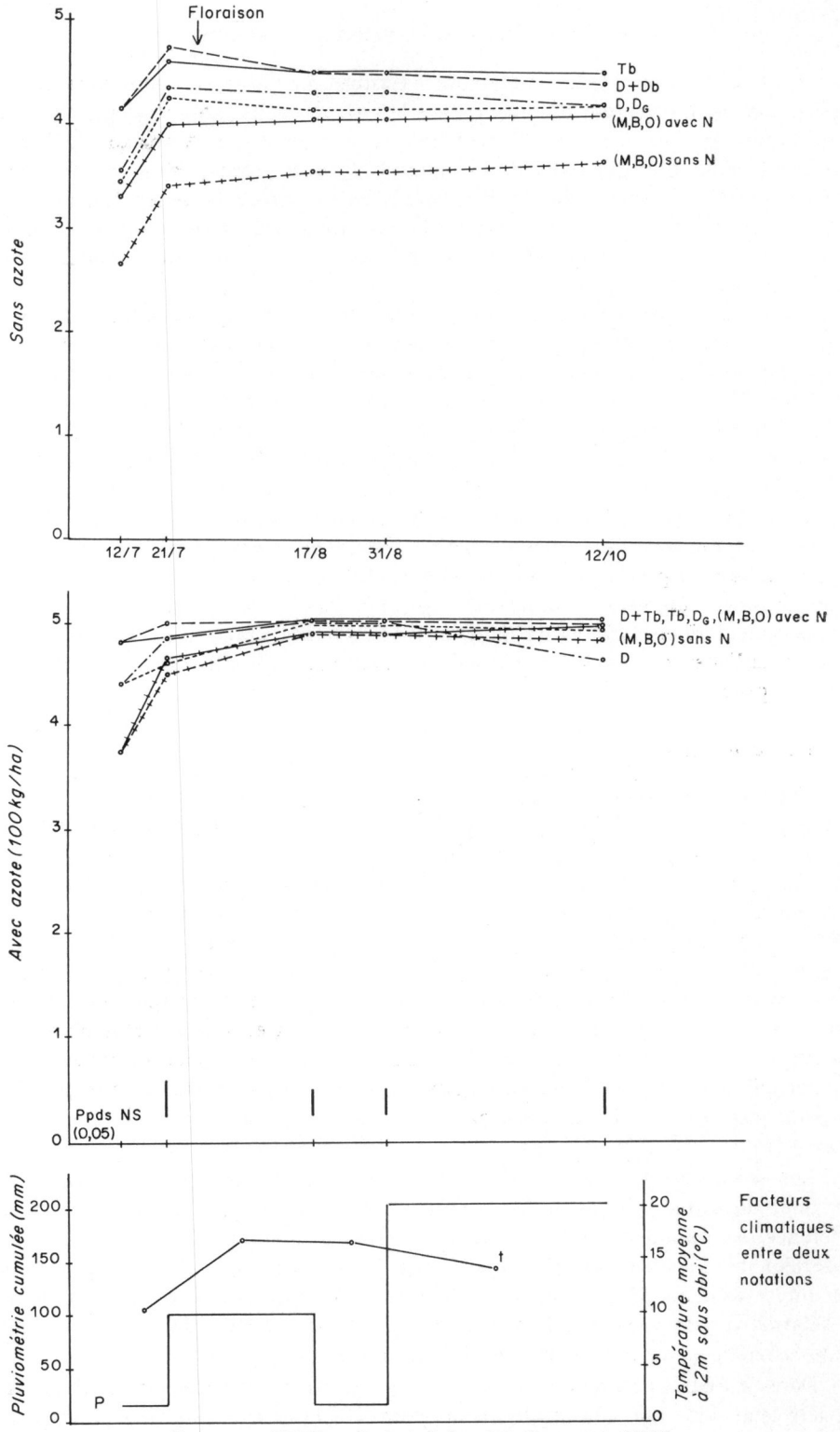



FIG. 4. — *Notation d'aspect de la végétation : maïs (1965).*

TABLEAU 16

*Rendements : maïs (1965)*

| Traitements | Doses d'azote sur le maïs (kg/ha) | Nombre d'épis/plante | Rendements M. S. | | | | Rapport grain/paille | Rapport rafles/grain |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Grain (q/ha) | Paille (t/ha) | Rafles (t/ha) | Total (t/ha) | | |
| 1 D | 0 | 0,95 | 54,79 | 3,660 | 0,846 | 9,985 | 1,496 | 0,154 |
| 3 D + Tb | 0 | 0,97 | 59,60 | 3,970 | 0,931 | 10,861 | 1,500 | 0,156 |
| 5 Tb | 0 | 0,94 | 59,38 | 3,910 | 0,924 | 10,772 | 1,518 | 0,155 |
| 7 $D_g$ | 0 | 0,94 | 54,91 | 3,650 | 0,832 | 9,973 | 1,504 | 0,151 |
| 9 M. B. O. (sans N) | 0 | 0,93 | 46,39 | 3,340 | 0,660 | 8,639 | 1,388 | 0,142 |
| 11 M. B. O. (avec N) | 0 | 0,98 | 53,06 | 3,650 | 0,821 | 9,777 | 1,453 | 0,154 |
| 2 D | 100 | 0,98 | 62,64 | 3,820 | 1,008 | 11,092 | 1,639 | 0,160 |
| 4 D + Tb | 100 | 0,97 | 66,55 | 4,670 | 1,088 | 12,413 | 1,425 | 0,163 |
| 6 Tb | 100 | 0,97 | 63,55 | 4,260 | 1,099 | 11,714 | 1,491 | 0,172 |
| 8 $D_g$ | 100 | 0,97 | 63,36 | 4,350 | 1,054 | 11,740 | 1,456 | 0,166 |
| 10 M. B. O. (sans N) | 100 | 0,94 | 60,44 | 4,360 | 0,994 | 11,398 | 1,386 | 0,164 |
| 12 M. B. O. (avec N) | 100 | 0,97 | 62,70 | 4,340 | 1,066 | 11,676 | 1,444 | 0,170 |
| P. poids (0,05) | | NS | 3,46 | 0,430 | NS | 0,773 | | |

(traitement 2), précédents pour lesquels on enregistre au 12-10 une diminution qui se traduit par des rendements moins bons. Il est possible que ce fait puisse s'expliquer par une insuffisance de la dose d'azote apportée, dans le cas particulier de ces traitements.

La hauteur des plantes, mesurée à deux reprises, le 27-7 et le 18-8 sur des individus pris au hasard dans chaque parcelle, n'a apporté que peu d'informations, sinon sur l'hétérogénéité de la variété. Des sondages ont permis d'estimer la hauteur définitive à 1 m 60.

Le nombre d'épis/plante, à la récolte, était le même dans tous les traitements (tabl. 16). Avant battage, 10 épis, pris au hasard dans chaque prélèvement parcellaire, ont été mesurés. Il n'y a pas eu de différences significatives entre précédents ; seul l'apport d'azote s'est légèrement manifesté sur la longueur moyenne (cm) :

avec azote : 16,44

p.p.d.s. (0,05) = 0,81

sans azote : 15,51

Il en est de même pour les poids de 1 000 grains à 85 p. 100 de M. S. (g) :

avec azote : 348,19

sans azote : 338,37

D'une manière générale d'ailleurs, chez le maïs, les composantes du rendement évoluent sûrement moins que chez le blé, ce qui est normal puisqu'il n'y a qu'un épi par plante. Par contre, le rendement en rafle semble assez variable. En outre sur le plan agronomique, la période de nitrification, chez le blé, coïncide avec celle de la

TABLEAU 17

*Exportations d'azote : maïs* (***1965***)

| Traitements | Doses d'azote sur le maïs (kg/ha) | Exportations (kg/ha) | | | | Teneurs en azote (en p. 100) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Grain | Paille | Rafles | Total | Grain | Paille | Rafles |
| 1 D ..... | 0 | 76,71 | 31,55 | 3,80 | 112,06 | 1,40 | 0,45 | 0,86 |
| 3 D + Tb ..... | 0 | 82,85 | 27,38 | 4,00 | 114,23 | 1,39 | 0,43 | 0,69 |
| 5 Tb ..... | 0 | 88,48 | 31,28 | 3,97 | 123,73 | 1,49 | 0,43 | 0,80 |
| 7 $D_g$ ..... | 0 | 73,59 | 30,70 | 3,66 | 107,94 | 1,34 | 0,44 | 0,84 |
| 9 M. B. O. (sans N) | 0 | 62,17 | 22,05 | 2,78 | 87,00 | 1,34 | 0,42 | 0,66 |
| 11 M. B. O. (avec N) .. | 0 | 74,81 | 29,92 | 3,86 | 108,59 | 1,41 | 0,47 | 0,82 |
| 2 D ..... | 100 | 99,59 | 34,80 | 4,53 | 138,92 | 1,59 | 0,45 | 0,91 |
| 4 D + Tb ..... | 100 | 105,15 | 45,32 | 5,00 | 155,47 | 1,58 | 0,46 | 0,97 |
| 6 Tb ..... | 100 | 99,13 | 43,89 | 5,06 | 148,08 | 1,56 | 0,46 | 1,03 |
| 8 $D_g$ ..... | 100 | 96,94 | 40,48 | 4,53 | 141,95 | 1,53 | 0,43 | 0,93 |
| 10 M. B. O. (sans N) .. | 100 | 95,49 | 36,18 | 4,17 | 135,84 | 1,58 | 0,42 | 0,83 |
| 12 M. B. O. (avec N) .. | 100 | 99,07 | 35,20 | 5,12 | 139,39 | 1,58 | 0,48 | 0,81 |
| P. p. d. s. (0,05) ... | | 5,28 | | | 8,36 | | | |

croissance des talles et du début de nutrition des graines, alors que chez le maïs, elle se situe au tout début de la végétation. La suite de séquences de fourniture d'azote par le sol risque donc d'être plus déterminante dans le cas du blé. Ces éléments sont à prendre en considération dans le choix des cultures permettant la meilleure mise en évidence des effets résiduels des précédents.

*Comparaison du rendement des deux espèces* (fig. 5)

Comme l'indique la figure, la relation entre les rendements du blé et du maïs n'est pas étroite, sauf après la succession (maïs, blé, orge). Rappelons que, dans ce cas particulier, le rendement du blé était affecté par le parasitisme.

Si on effectue une analyse des rendements en matière sèche (grain et total) des deux cultures, leur variance se répartit ainsi :

| Origine de la variation | Carrés moyens | Grain | | Total | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | F | P % | CM | F | P % |
| Culture (C) | 4 698,40 | 2 560,86 | 0,1 | 14 234,93 | 949,00 | 0,1 |
| Apport d'azote (N) | 486,00 | 264,89 | » | 2 213,6 | 147,58 | » |
| Précédent (P) | 203,65 | 111,00 | » | 542,43 | 36,16 | » |
| C × N | NS | | | 37,33 | 2,49 | 25 |
| C × P | 76,42 | 41,65 | » | 231,69 | 15,45 | 0,5 |
| N × P | 12,91 | 7,04 | 1 | 32,06 | 2,14 | 25 |

Il existe une interaction (culture × précédent) au niveau des rendements en grain et totaux (fig. 5). Seuls les résultats sur blé correspondent à des différences importantes. Il n'y a pas d'interaction (culture × apport d'azote), les deux cultures tests répondent positivement à l'apport de cet élément. Par contre, il existe une interaction (azote × précédent) mais au seul niveau du rendement en grain : il n'y a pas ou peu de réponse à l'azote derrière le Trèfle blanc. Il importe de constater que le rendement en grain est de loin la mesure la plus sensible exprimant les effets des différents précédents :

| | Effets précédents en valeurs relatives | |
|---|---|---|
| | Grain | Total |
| Dactyle pur | 261 | 130 |
| Dactyle + Trèfle blanc | 266 | 140 |
| Trèfle blanc | 289 | 147 |
| Dactyle graine | 262 | 132 |
| Maïs + blé + orge (sans azote) | 100 | 100 |
| Maïs + blé + orge (avec azote) | 134 | 112 |

Cependant, après les quatre cultures fourragères, et en présence d'apports d'azote, le rendement en grain du blé arrive à un plafond, alors que celui en paille progresse encore, extériorisant probablement une fourniture tardive d'azote par le sol.

Une remarque s'impose au sujet du précédent « Trèfle blanc » : son effet est moins net sur le rendement du maïs que sur celui du blé. Ceci pourrait être la conséquence

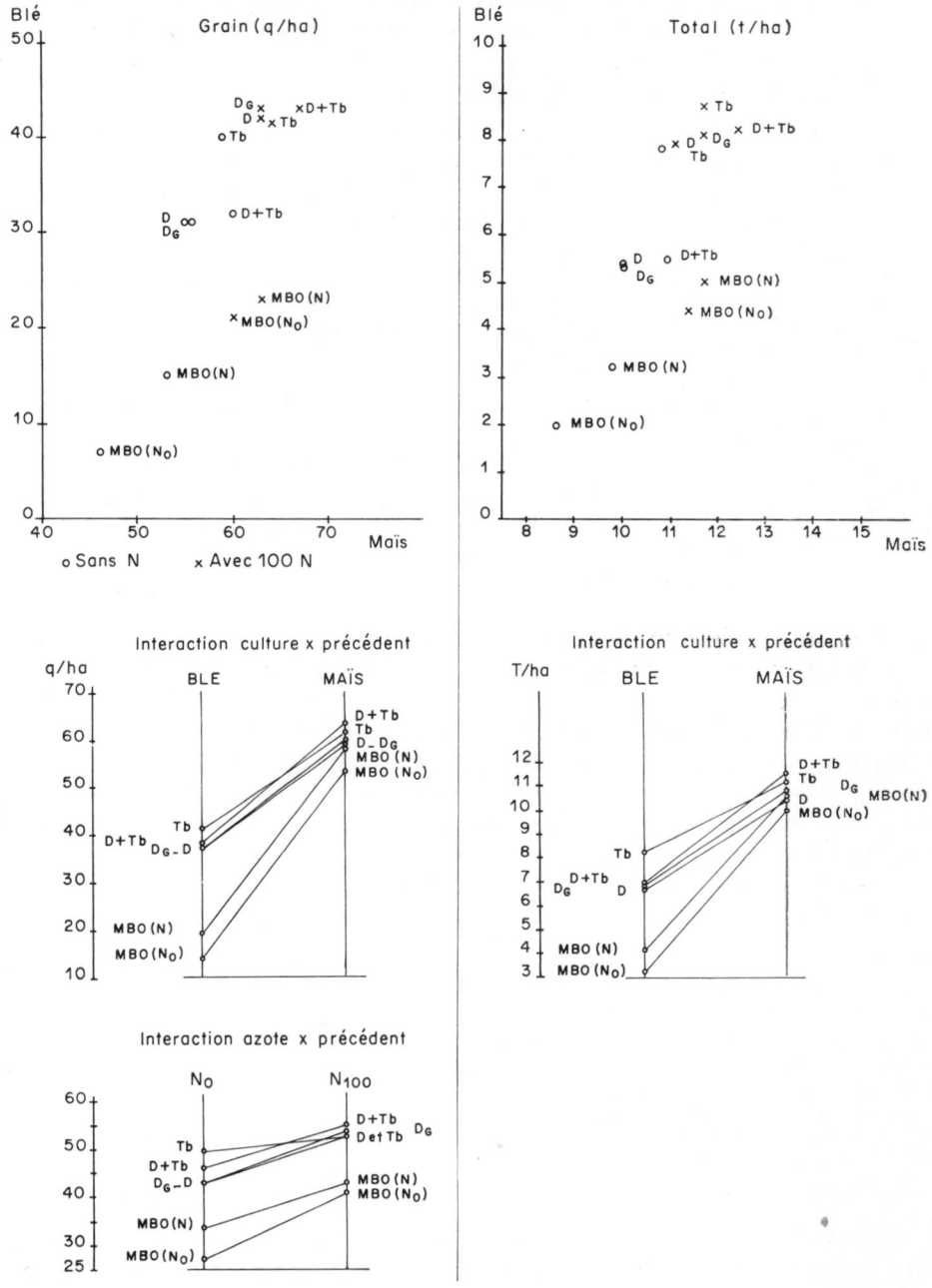



FIG. 5. — *Comparaison du rendement des deux espèces (M. S.).*

d'une perte d'azote par lessivage, dans la mesure où cet élément est un facteur prépondérant du rendement. Dans ce cas, un labour de retournement plus tardif de la légumineuse, s'il avait été possible, aurait été bénéfique. De toute façon, ceci illustre l'évolution d'un même milieu édaphique selon qu'il est emblavé ou reste nu. Ainsi les résidus de Trèfle blanc conduiraient à un état instable du fait des possibilités d'une minéralisation rapide d'une partie d'entre eux, suivie d'une « solubilisation » de l'azote, le phénomène étant beaucoup moins intense pour le dactyle. Quant à l'association Graminée — Trèfle blanc, elle a un comportement particulier.

Les conclusions de cette première année de culture-test semblent pouvoir s'énoncer ainsi :

1° l'effet de l'azote des engrais est déterminant : c'est là le facteur principal du rendement ;

2° selon les cultures utilisées, en phase de mesure (blé ou maïs), les résultats obtenus sont différents, essentiellement en présence de précédents prairiaux ;

3° les besoins particuliers de chaque plante-test et l'offre en éléments nutritifs du sol interagissent pour conditionner le résultat final : un déséquilibre à un certain moment est souvent impossible à compenser par la suite ;

4° si l'apport d'azote assure des rendements plus réguliers, et ce indépendamment du précédent, l'engrais paraît beaucoup mieux utilisé pour les traitements les plus pauvres en matière organique (tabl. 18) :

TABLEAU 18

*Gains de M. S. de maïs* (t/ha) *obtenus avec 100 unités d'azote et pourcentage d'utilisation de l'azote*

| Précédents | Gains [(Précédent + $N_{100}$)—Précédent] | P. 100 d'utilisation de l'azote (1) |
|---|---|---|
| Dactyle | + 1,107 | 27 |
| Dactyle (G) | + 1,767 | 34 |
| M. B. O. (sans N) | + *2,759* | *49* |
| M. B. O. (avec N) | + 1,899 | 31 |

(1) [(Précédent + $N_{100}$) — Précédent] sur la base des exportations d'azote.

TABLEAU 19

*Relation entre le bilan azoté des précédents et le rendement en M.S.*

| Traitements | Bilan azoté | Rendement total en M. S. (t/ha) | |
|---|---|---|---|
| | | Blé | Maïs |
| 1 Dactyle | — 95 | 5,385 | 9,985 |
| 7 Dactyle (G) | + 44 | 5,268 | 9,973 |
| 2 Dactyle | — 95 | 7,890 | 11,092 |
| 8 Dactyle (G) | + 44 | 8,073 | 11,740 |

TABLEAU 20

*Rendements : maïs (1966)*

| Traitements | Doses d'azote (kg/ha) sur le | | Nombre d'épis/ plante | Rendements (M. S.) | | | | Rapport grain/paille | Rapport rafles/grain |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Blé 1965 | Maïs 1966 | | Grain (q/ha) | Paille (t/ha) | Rafles (t/ha) | Total (t/ha) | | |
| 1 D | 0 | 0 | 0,96 | 47,31 | 3,845 | 1,236 | 9,812 | 1,230 | 0,261 |
| 3 D + Tb | 0 | 0 | 0,97 | 50,21 | 4,211 | 1,217 | 10,449 | 1,192 | 0,242 |
| 5 Tb | 0 | 0 | 0,96 | 48,18 | 4,293 | 1,191 | 10,302 | 1,122 | 0,247 |
| 7 $D_g$ | 0 | 0 | 0,94 | 46,17 | 4,129 | 1,200 | 9,946 | 1,118 | 0,259 |
| 9 M. B. O. (sans N) | 0 | 0 | 0,93 | 41,49 | 4,016 | 1,083 | 9,248 | 1,033 | 0,261 |
| 11 M. B. O. (avec N) | 0 | 0 | 0,94 | 45,25 | 4,027 | 1,170 | 9,722 | 1,123 | 0,258 |
| 2 D | 100 | 100 | 0,94 | 56,97 | 3,734 | 1,343 | 10,774 | 1,525 | 0,235 |
| 4 D + Tb | 100 | 100 | 0,92 | 59,22 | 3,849 | 1,400 | 11,171 | 1,538 | 0,236 |
| 6 Tb | 100 | 100 | 0,97 | 58,42 | 4,051 | 1,384 | 11,277 | 1,442 | 0,236 |
| 8 $D_g$ | 100 | 100 | 0,96 | 60,19 | 4,020 | 1,414 | 11,453 | 1,497 | 0,235 |
| 10 M. B. O. (sans N) | 100 | 100 | 0,97 | 58,67 | 4,244 | 1,410 | 11,521 | 1,382 | 0,240 |
| 12 M. B. O. (avec N) | 100 | 100 | 0,96 | 59,75 | 4,109 | 1,339 | 11,423 | 1,454 | 0,224 |
| P.p.d.s. (0,05) | | | | 4,93 | NS | | 1,000 | | |

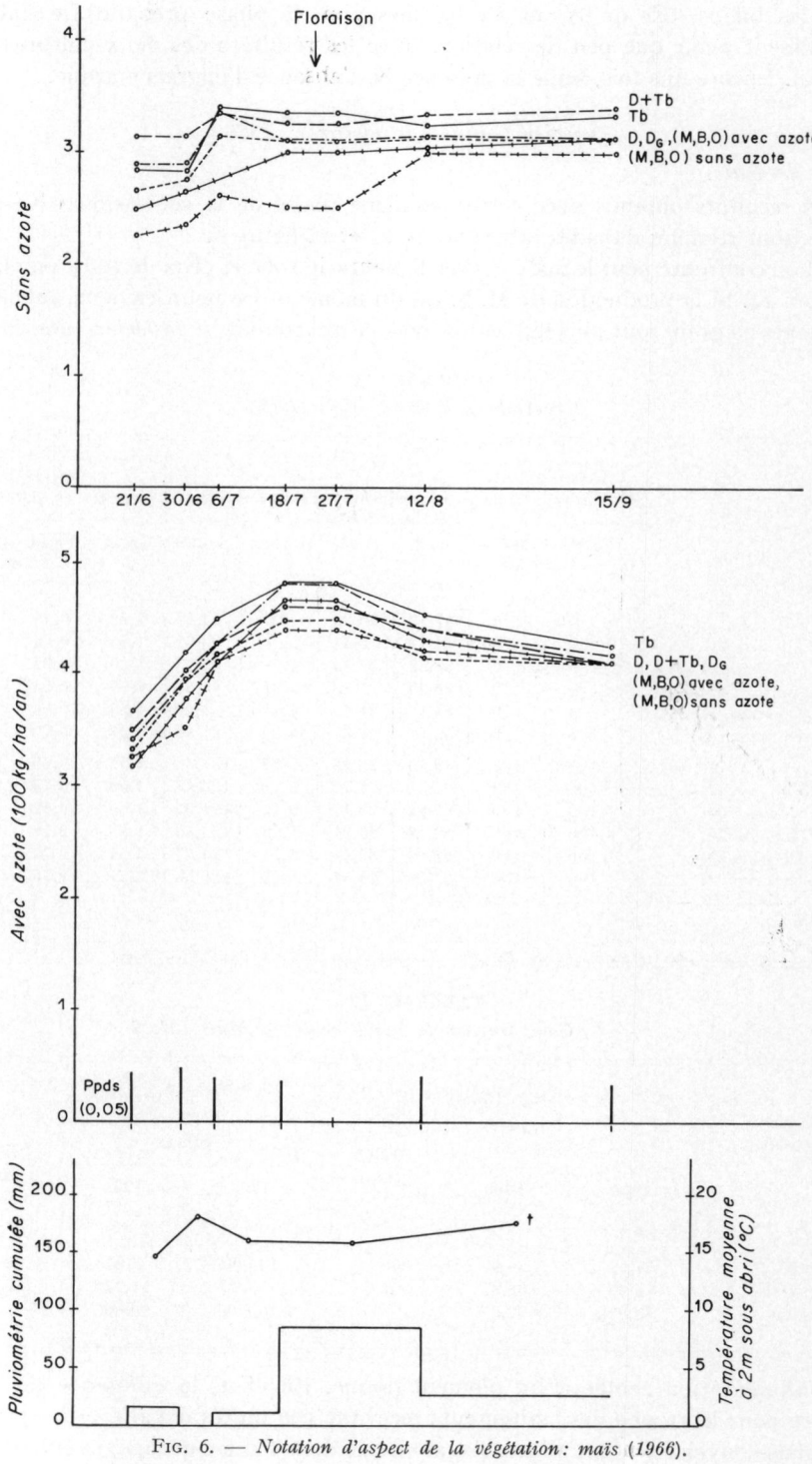



FIG. 6. — *Notation d'aspect de la végétation: maïs (1966).*

5° les bilans, tels qu'ils ont été calculés pour la phase préparatoire (tabl. 4) ne paraissent avoir que peu de relations avec les résultats des deux cultures-tests (tabl. 19). Encore une fois, seule la présence ou l'absence d'engrais marque.

*Deuxième année de mesure : 1966*

*Culture de maïs.*

Les résultats obtenus avec cette deuxième phase de la succession « blé-maïs-avoine » sont résumés dans les tableaux 20, 21 et la figure 6.

Si l'on confronte pour le maïs, les rendements de 1966 et ceux de 1965, on obtient le tableau 22. Si la production de M. S. est du même ordre pour les deux années, les rendements en grain sont plus faibles en 1966, ce qui traduit, *a posteriori*, une carence

TABLEAU 21

*Exportations d'azote : maïs (1966)*

| Traitements | Doses d'azote (kg/ha) sur le | | Exportations d'azote (kg/ha) | | | | Teneurs en azote (%) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Blé | Maïs | Grain | Paille | Rafles | Total | Grain | Paille | Rafles |
| 1 D | 0 | 0 | 57,72 | 20,38 | 5,07 | 83,17 | 1,22 | 0,55 | 0,51 |
| 3 D + Tb | 0 | 0 | 62,77 | 22,32 | 5,00 | 90,09 | 1,25 | 0,52 | 0,36 |
| 5 Tb | 0 | 0 | 57,82 | 22,75 | 4,88 | 85,45 | 1,20 | 0,52 | 0,48 |
| 7 $D_g$ | 0 | 0 | 56,79 | 21,88 | 4,91 | 83,58 | 1,23 | 0,55 | 0,44 |
| 9 M. B. O. (sans N) | 0 | 0 | 55,18 | 21,28 | 4,44 | 80,90 | 1,33 | 0,55 | 0,32 |
| 11 M. B. O. (avec N) | 0 | 0 | 55,67 | 21,34 | 4,79 | 81,80 | 1,23 | 0,49 | 0,36 |
| 2 D | 100 | 100 | 89,45 | 26,88 | 4,97 | 121,30 | 1,57 | 0,69 | 0,34 |
| 4 D + Tb | 100 | 100 | 93,58 | 27,72 | 5,18 | 126,48 | 1,58 | 0,73 | 0,35 |
| 6 Tb | 100 | 100 | 87,63 | 29,17 | 5,12 | 121,92 | 1,50 | 0,62 | 0,39 |
| 8 $D_g$ | 100 | 100 | 88,48 | 28,94 | 5,23 | 122,65 | 1,47 | 0,79 | 0,38 |
| 10 M. B. O. (sans N) | 100 | 100 | 88,60 | 30,56 | 5,21 | 124,37 | 1,51 | 0,72 | 0,33 |
| 12 M. B. O. (avec N) | 100 | 100 | 92,02 | 29,58 | 4,95 | 126,55 | 1,54 | 0,76 | 0,40 |
| P.p.d.s. (0,05) | | | 2,88 | | | 4,07 | | | |

TABLEAU 22

*Comparaison des rendements en Maïs (M. S.)*

| Traitements | Grain (q/ha) | | | Total (t/ha) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Années | | Effet « azote » | Années | | Effet « azote » |
| | 1965 | 1966 | | 1965 | 1966 | |
| Sans azote | 54,69 | 46,43 | 50,56 | 10,000 | 9,943 | 9,971 |
| Avec azote ($N_{100}$) | 63,20 | 58,87 | 61,03 | 11,672 | 11,270 | 11,471 |
| Effet « année » | 58,94 | 52,65 | | 10,826 | 10,606 | |

dans l'alimentation azotée à un moment donné. En effet, la différence est moins marquée pour le groupe des traitements recevant 100 unités d'azote, correspondant à des maïs convenablement alimentés, alors que dans l'autre groupe, la culture était

tributaire de la minéralisation. Ceci est confirmé, en 1966, comme en 1965, par les notes d'aspect. « Avec azote », ces notes progressent de façon continue dans le temps, tandis que « sans azote », à la période de début floraison, l'aspect extérieur de la végétation traduit une demande non satisfaite (fig. 6).

Notons que la hauteur des plantes, dans les divers traitements, fut estimée entre 1,60 m et 1,70 m et que le nombre d'épis fut le même partout (tabl. 20). La longueur moyenne des épis (en cm) fut de 15,57 avec azote contre 14,23 sans azote (P.p.d.s. — 0,05 : 0,46). Comme en 1965, l'azote entraîne une légère augmentation de longueur. Par contre, les poids de 1 000 grains sont, en 1966, de même ordre( en g à 85 p. 100 de M. S. ) : avec azote 298,8, sans azote 301, 6.

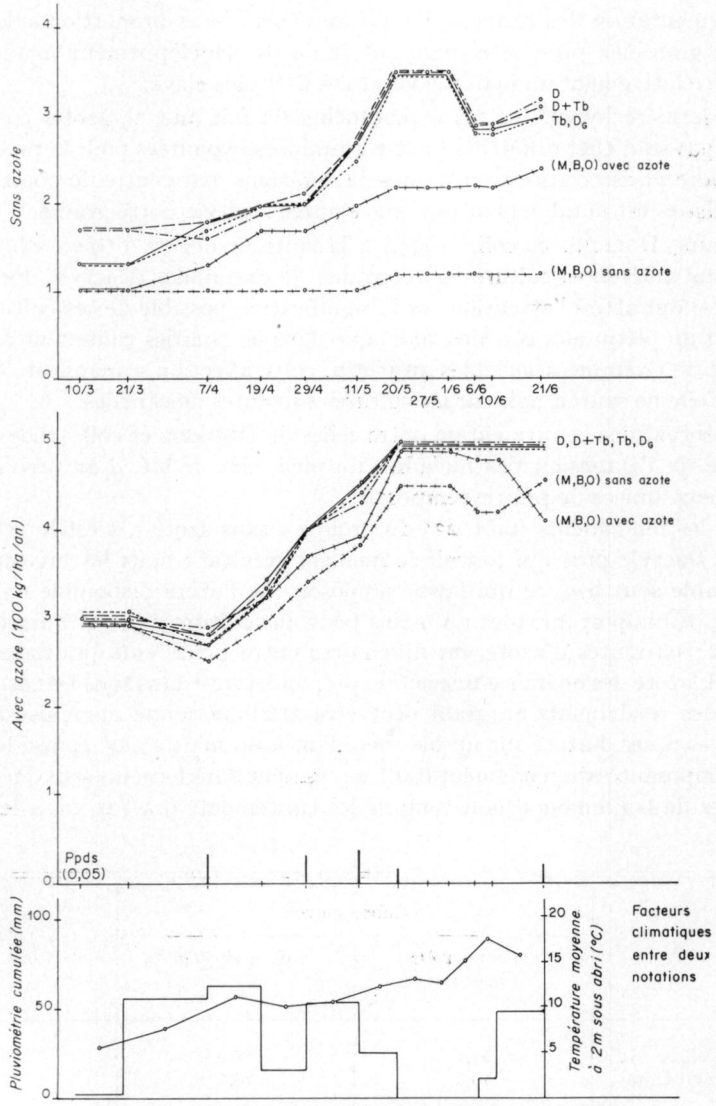



FIG. 7. — *Notation d'aspect de la végétation: blé (1966).*

*Culture de blé.*

Les données concernant cette deuxième phase de la succession : maïs, blé, avoine sont résumées aux tableaux 23 et 24 et à la figure 7. En 1966, l'appréciation de l'attaque d'*Ophiobolus graminis* a été réalisée par le laboratoire de Pathologie de l'E. N. S. A. de Rennes et peut se récapituler ainsi que dans le tableau 25. Il apparaît une relation étroite entre l'attaque du champignon et les disponibilités en azote, surtout pour les traitements 9 à 12. Trois explications sont possibles sans que l'on ait d'éléments déterminants de choix entre l'une plutôt que les autres :

— liaison de type biologique entre *Ophiobolus* et capacité de nutrition azotée,

— effet de l'attaque atténué par l'apport d'azote minéral,

— augmentation des chances d'avoir de l'*Ophiobolus* proportionnelle au pourcentage de graminée pure atteignant un stade de développement avancé, ce qui entraîne corrélativement un matériel végétal à C/N plus élevé.

Cette dernière hypothèse est à rapprocher du fait que, si, azotes confondus, il n'apparaît pas ici d'effet différentiel entre graminées exploitées pour la production de fourrage (pure et association), en termes de notations, par contre, le pourcentage de plantes malades est notablement plus élevé après Dactyle porte-graine.

D'ailleurs, Dolling et coll. (1959), à la suite de dégâts d'*Ophiobolus graminis* signalés dans différentes cultures porte-graine de graminées (Dactyle, Fléole, Fétuque des prés) ont attiré l'attention sur la signification possible de ces cultures, quant au transfert du piétin aux céréales, alors que dans les prairies contenant un mélange de Trèfle et de Graminées sensibles au piétin, cette affection se manifeste à un degré si faible qu'elle ne saurait agir sur les cultures suivantes de céréales.

Ces observations confirment en outre celles de Defosse et coll. (1968) sur l'effet défavorable de l'extension des maladies du pied, chez le blé, d'un précédent constitué par deux années de prairie temporaire.

Parmi les rendements (tabl. 23) du groupe « sans azote », c'est le traitement 1 (précédent Dactyle pur) qui fournit le meilleur résultat ; mais les niveaux atteints par l'ensemble sont bas, ce qui laisse supposer que l'azote disponible en deuxième année était peu important, tout au moins pour une culture d'hiver. Parmi les traitements avec 100 unités d'azote, les différences entre précédents prairiaux sont peu marquées. L'azote des engrais a une action prépondérante dans tous les cas. Le niveau peu élevé des rendements en grain peut être attribué à une mauvaise répartition hivernale des doses d'azote sur un blé succédant à un maïs ayant épuisé le milieu.

Les composantes du rendement (tabl. 24) varient dans le même sens que ce dernier. Par groupes de traitements (non compris les traitements 9 à 12), on a les résultats ci-après :

| | Nombre moyen | | Poids 1 000 grains |
|---|---|---|---|
| | d'épis au mètre linéaire | de grains/épi | |
| Sans azote ..... | 52,4 | 18,0 | 43,76 |
| Avec 100 unités d'azote .. | 70,3 | 26,4 | 52,00 |

TABLEAU 23

*Rendements et exportations d'azote : blé (1966)*

| Traitements | Doses d'azote kg/ha sur le | | Rendements M. S. | | | Exportations d'azote (kg/ha) | | | Rapport grain / paille | Teneurs en azote (en p. 100) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | maïs 1965 | blé 1966 | grain (q/ha) | paille (t/ha) | total (t/ha) | grain | paille | total | | grain | paille |
| 1 D | 0 | 0 | 16,71 | 3,854 | 2,183 | 28,57 | 10,27 | 38,84 | 0,765 | 1,71 | 0,47 |
| 3 D + Tb | 0 | 0 | 15,61 | 2,022 | 3,583 | 26,54 | 7,90 | 34,44 | 0,772 | 1,70 | 0,39 |
| 5 Tb | 0 | 0 | 14,84 | 1,866 | 3,350 | 25,23 | 6,91 | 32,14 | 0,795 | 1,70 | 0,37 |
| 7 $D_g$ | 0 | 0 | 13,99 | 1,755 | 3,154 | 24,06 | 7,38 | 31,44 | 0,797 | 1,72 | 0,42 |
| 9 M. B. O. (sans N) | 0 | 0 | 6,56 | 1,161 | 1,817 | 11,29 | 6,50 | 17,79 | 0,565 | 1,72 | 0,56 |
| 11 M. B. O. (avec N) | 0 | 0 | 9,95 | 1,466 | 2,461 | 17,42 | 5,88 | 23,30 | 0,678 | 1,75 | 0,40 |
| 2 D | 100 | 100 | 37,96 | 5,066 | 8,862 | 64,91 | 16,73 | 81,64 | 0,749 | 1,71 | 0,33 |
| 4 D + Tb | 100 | 100 | 38,00 | 5,155 | 8,955 | 64,97 | 18,05 | 83,02 | 0,737 | 1,71 | 0,35 |
| 6 Tb | 100 | 100 | 37,70 | 5,348 | 9,118 | 67,48 | 19,78 | 87,26 | 0,705 | 1,79 | 0,37 |
| 8 $D_g$ | 100 | 100 | 38,52 | 4,998 | 8,850 | 65,86 | 16,00 | 81,86 | 0,770 | 1,71 | 0,32 |
| 10 M. B. O. (sans N) | 100 | 100 | 27,43 | 4,077 | 6,820 | 46,91 | 17,96 | 64,87 | 0,673 | 1,71 | 0,44 |
| 12 M. B. O. (avec N) | 100 | 100 | 31,18 | 4,660 | 7,778 | 53,01 | 16,79 | 69,80 | 0,670 | 1,70 | 0,36 |
| P.p.d.s. (0,05) | | | 2,56 | 0,300 | 0,456 | 4,33 | 1,20 | 5,19 | | | |

TABLEAU 24

*Composantes du rendement : blé (1966)*

| Traitements | Doses d'azote kg/ha sur le | | Nombre (par mètre linéaire) | | | Nombre d'épis/talles | Nombre de grains/épis | Poids de 1 000 grains (g) | Échaudage 0 à 5 (1) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Maïs 1965 | Blé 1966 | Plantes levées | Total de talles | Épis | | | | |
| 1 D | 0 | 0 | 59,1 | 100,8 | 56,5 | 0,56 | 18,5 | 44,77 | 3,9 |
| 3 D + Tb | 0 | 0 | 59,5 | 102,1 | 51,0 | 0,50 | 18,6 | 43,07 | 3,6 |
| 5 Tb | 0 | 0 | 56,6 | 96,3 | 51,0 | 0,53 | 18,0 | 44,59 | 3,4 |
| 7 Dg | 0 | 0 | 59,5 | 88,6 | 51,0 | 0,57 | 17,0 | 42,61 | 3,1 |
| 2 D | 100 | 100 | 61,6 | 133,8 | 75,0 | 0,56 | 26,3 | 51,78 | 3,5 |
| 4 D + Tb | 100 | 100 | 54,8 | 114,6 | 64,8 | 0,56 | 28,2 | 51,81 | 3,6 |
| 6 Tb | 100 | 100 | 60,6 | 117,8 | 65,7 | 0,56 | 24,8 | 52,42 | 2,8 |
| 8 Dg | 100 | 100 | 55,1 | 126,8 | 75,5 | 0,59 | 26,2 | 51,98 | 3,1 |
| 9 M. B. O. (sans N) | 0 | 0 | 60,3 | 68,9 | 39,2 | 0,57 | 14,0 | 35,32 | 1,4 |
| 11 M. B. O. (avec N) | 0 | 0 | 58,3 | 79,1 | 44,0 | 0,56 | 17,3 | 38,32 | 2,8 |
| 10 M. B. O. (sans N) | 100 | 100 | 58,0 | 112,6 | 60,3 | 0,54 | 26,8 | 45,10 | 2,2 |
| 12 M. B. O. (avec N) | 100 | 100 | 60,8 | 127,3 | 70,7 | 0,55 | 26,2 | 51,60 | 3,2 |
| P.p.d.s. (0,05) | | | NS | 10,4 | 11,4 | | 4,2 | 3,38 | 0,5 |

(1) 5 : non échaudé.

TABLEAU 25

*Notations d'*Ophiobolus graminis

| Traitements | $N_0$ | | | | | | $N_{100}$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 D | 3 D + Tb | 5 Tb | 7 $D_g$ | 9 M. B. O. sans N | 11 M. B. O. avec N | 2 D | 4 D + Tb | 6 Tb | 8 $D_g$ | 10 M. B. O. sans N | 12 M. B. O. avec N |
| Note de 0 (pas de maladie) à 6 (absence d'épiaison) ..... | 1,33 | 1,50 | 2,33 | 1,50 | 5,33 | 3,83 | 1,33 | 1,42 | 1,75 | 1,08 | 4,08 | 3,41 |
| Pourcentage de plantes malades ..... | 45,0 | 40,0 | 42,7 | 49,3 | 83,8 | 56,0 | 26,2 | 18,8 | 29,1 | 43,5 | 62,1 | 37,4 |

TABLEAU 26

*Effets comparés des traitements sur les mensurations*

| | Dose d'azote sur le blé | Traitements | | | | | | Moyenne |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | D | D + Tb | Tb | $D_g$ | M. B. O. sans N | M. B. O. avec N | |
| Hauteur à la récolte (cm) | 0 | 84,1 | 85,8 | 82,8 | 80,0 | 61,6 | 73,7 | 77,9 |
| | 100 | 110,3 | 110,3 | 110,0 | 110,1 | 103,6 | 109,1 | 108,9 |
| Croissance (cm) (1) | 0 | 31,5 | 34,0 | 33,0 | 33,2 | 28,9 | 32,6 | 32,2 |
| | 100 | 28,1 | 29,0 | 26,0 | 25,6 | 27,2 | 27,1 | 27,2 |

(1) Hauteur à la récolte — hauteur à l'épiaison.

Contrairement à ce qui s'était passé en 1965, il n'y a pas eu de phénomène de compensation. On peut donc penser à une carence en azote durant la croissance (mauvaise minéralisation en 1966), dont l'effet aurait été augmenté par l'attaque du piétin, *Ophiobolus graminis* diminuant notablement le poids de 1 000 grains en cas d'attaque sévère (DEFOSSE et coll., 1968).

Les notes d'aspect (fig. 7), comme précédemment, manifestent l'effet bénéfique de la fertilisation azotée, sous la forme d'une croissance régulière des notes, alors qu'en l'absence d'azote apporté, les notes dépendent des facteurs écologiques. Les notes les moins élevées doivent être attribuées à une carence en azote particulièrement intense. Ceci se retrouve d'ailleurs si on compare les hauteurs (tabl. 26).

Les hauteurs définitives sont toutes du même ordre dans le groupe « azote 100 », quels que soient les précédents prairiaux ; elles sont inférieures et variables dans l'autre groupe.

En conclusion, la croissance d'un blé d'hiver dépend de la présence d'azote facilement accessible à un rythme déterminé et, dans ce cas particulier, le maïs se révèle comme un précédent épuisant.

TABLEAU 27

*Exportations totales*

(t/ha M. S.)

| Précédents | Rendements de la phase préparatoire | Succession (blé, maïs) | | | | Succession (maïs, blé) | | | | Moy. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Blé | Maïs | Total | Rang | Maïs | Blé | Total | Rang | |
| Dactyle pur ..... | 22,38 | 5,385 | 9,812 | 15,197 | 4 | 9,985 | 3,854 | 13,839 | 3 | 14,518 |
| Dactyle (G)..... | 19,46 | 5,268 | 9,946 | 15,214 | 3 | 9,973 | 3,154 | 13,127 | 4 | 14,170 |
| Dactyle + Tb.... | 18,76 | 5,526 | 10,449 | 15,975 | 2 | 10,861 | 3,583 | 14,444 | 1 | 15,209 |
| M. B. O. (avec N) | 15,36 | 3,251 | 9,722 | 12,973 | 5 | 9,777 | 2,461 | 12,238 | 5 | 12,605 |
| Trèfle blanc..... | 11,93 | 7,802 | 10,302 | 18,104 | 1 | 10,772 | 3,350 | 14,122 | 2 | 16,113 |
| M. B. O. (sans N) | 6,65 | 2,052 | 9,248 | 11,300 | 6 | 8,639 | 1,817 | 10,456 | 6 | 10,878 |
| Moyenne ..... | | | | 14,793 | | | | 13,036 | | |

*Conclusions sur la deuxième année de culture.*

La figure 8 illustre le tamponnement des effets précédents par rapport à 1965. La réponse est sensiblement la même pour les traitements 9 à 12.

*Conclusions sur les deux années de culture.*

Plutôt que d'essayer d'interpréter l'effet résiduel des différents précédents sur les deuxièmes cultures, il est préférable, à ce stade de l'obtention des résultats, d'estimer globalement les incidences au niveau des successions ordonnées « blé, maïs » ou « maïs, blé ». De toutes manières, blé et maïs, pris isolément, ne sauraient être comparés, car leur réaction est fort différente, comme cela a été montré par ailleurs (JACQUARD et coll., 1969).

Chaque précédent ayant été suivi des deux successions, on va essayer de dégager les relations les plus importantes qui lient les rendements des cultures-tests aux caractéristiques de la phase préparatoire. Ces relations, qu'il est possible d'envisager, sont au nombre de trois :

*a*) relation entre les rendements de la phase préparatoire et ceux des deux successions,

*b*) relation entre le bilan de l'azote et les rendements des successions,

*c*) relation avec les disponibilités en azote.

Pour les deux premières, on ne tiendra compte que des cultures-tests sans azote, car l'apport d'une fertilisation azotée peut déterminer des interactions avec la matière organique présente dans le sol (quantité ; qualité : richesse en azote ; etc.).

a) *Relation entre les rendements en M. S. de la phase préparatoire et ceux des deux successions.*

Il semble qu'il n'y ait pas de liaison entre les deux variables (tabl. 27). Le rendement des successions dépend plus de la nature du système biologique précédent que du rendement en matière sèche de ce système, comme en témoigne la discordance du classement pour les paires (Dactyle pur, succession) et (Dactyle graine, succession). On remarquera aussi le gain de près de 2 t de M. S. réalisé avec la succession (blé, maïs) et le relatif accord entre les classements (fig. 9).

b) *Relation entre le bilan de l'azote et les rendements des successions.*

Il n'apparaît pas de liaison entre les bilans d'azote et les rendements (tabl. 28) ce qui est particulièrement évident quand on compare les successions, comportant les précédents (M. B. O.) (avec azote) et Dactyle pur, dont les bilans sont opposés. Aucune différence dans les bilans ne se reflète dans le rendement de l'une quelconque des cultures. Il est particulièrement remarquable que les deux successions (M. B.) et (B. M.) aboutissent, pour chaque précédent, à un même point d'évolution en 1967. Évidemment, des bilans calculés ainsi ne sont qu'une approximation de l'azote théoriquement présent dans le sol, puisqu'ils ne tiennent pas compte de la minéralisation. Il est possible que ceci explique, en partie, l'absence de relation.

c) *Relation avec les disponibilités en azote.*

Les résultats obtenus sur les quatre cultures soulignent l'effet de l'azote directement disponible pour les plantes, comme facteur principal du rendement, puisque, dans tous les cas, c'est l'azote apporté qui a l'effet prépondérant. Le tableau 29 résume l'effet de l'azote sur le rendement total pour les deux successions. D'une manière générale, on peut dire que les précédents prairiaux ont des effets identiques en présence d'azote, lequel minimise leurs différences. Par contre, en l'absence de fertilisation azotée, le rendement en matière sèche d'une culture donnée exprime l'interaction entre cette culture et l'effet « précédent », assimilable à un effet « azote ». L'estimation sur la succession de deux cultures minimise l'effet propre à chaque plante. Si l'on analyse plus finement les données du tableau 31, on constate que l'ordre de succession des cultures, à précédent identique, est une donnée importante. Avec 200 unités d'azote des engrais, les meilleurs rendements en M. S. sont obtenus avec la succession (M. B.) alors que sans engrais, le classement est inversé. Ces

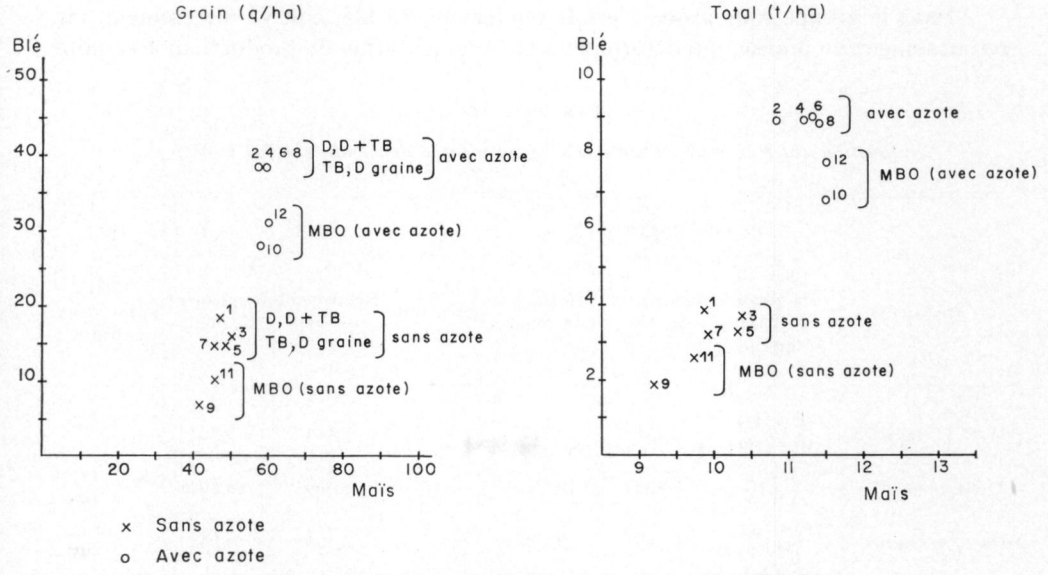



FIG. 8. — *Comparaison du Rendement des deux espèces.* (M. S.)

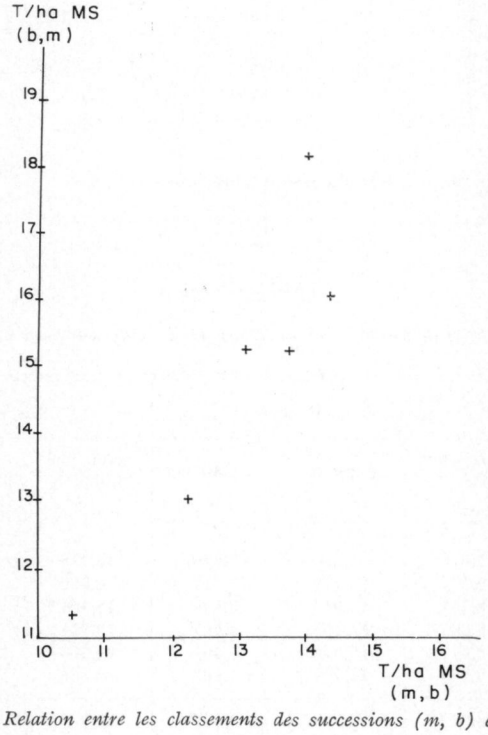



FIG. 9. — *Relation entre les classements des successions (m, b) et (b, m).*

tendances divergentes sont très facilement explicables par le comportement des deux cultures de première année.

Dans le groupe sans azote, c'est le rendement du blé, cultivé directement sur retournement de prairie, qui détermine cette augmentation de production, à la suite

TABLEAU 28

*Relation entre le bilan d'azote et le rendement d'une culture* (t/ha de M.S.)

| Précédents | 1965 | | | 1966 | | | 1967 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Bilan de la phase préparatoire (1) | Rendement du blé | Rendement du maïs | Bilan après une culture | Rendement du blé | Rendement du maïs | Bilan après deux cultures |
| M. B. O. (avec N) | + 136<br>+ 136 | 3,251 | 9,777 | + 97<br>+ 27 | 2,461 | 9,722 | + 15<br>+ 4 |
| Trèfle blanc (2) ... | $+ x$<br>$+ x$ | 7,802 | 10,772 | $x - 96$<br>$x - 124$ | 3,350 | 10,302 | $x - 181$<br>$x - 166$ |
| Dactyle graine ... | + 44<br>+ 44 | 5,268 | 9,973 | — 22<br>— 64 | 3,154 | 9,946 | — 106<br>— 95 |
| Dactyle + Tb (2) . | $y$<br>$y$ | 5,526 | 10,861 | $y - 65$<br>$y - 114$ | 3,583 | 10,449 | $y - 155$<br>$y - 148$ |
| M. B. O. (sans N) . | — 69<br>— 69 | 2,052 | 8,639 | — 91<br>— 156 | 1,817 | 9,248 | — 172<br>— 174 |
| Dactyle pur ..... | — 95<br>— 95 | 3,251 | 9,777 | — 134<br>— 217 | 3,854 | 9,812 | — 217<br>— 256 |

(1) kg/ha d'azote
(2) Le reliquat d'azote dû à la légumineuse est inconnu

TABLEAU 29

*Effet* (t/ha de M. S.) *de l'apport de 200 unités d'azote*

| Précédents | Succession (B. M.) | | | Succession (M. B.) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Avec 200 unités N | Sans N | Gain | Avec 200 unités N | Sans N | Gain |
| M. B. O. (sans N) . | 15,918 | 11,300 | 4,618 | 18,218 | 10,456 | 7,762 |
| Dactyle (G) ..... | 19,526 | 15,214 | 4,312 | 20,590 | 13,127 | 7,463 |
| M. B. O. (avec N) . | 16,457 | 12,973 | 3,494 | 19,454 | 12,238 | 7,215 |
| Dactyle pur ..... | 18,664 | 15,197 | 3,467 | 19,954 | 13,839 | 6,115 |
| Dactyle + Tb .... | 19,379 | 15,975 | 3,404 | 21,368 | 14,444 | 6,924 |
| Trèfle blanc ..... | 19,967 | 18,104 | 1,863 | 20,832 | 14,122 | 6,710 |
| Moyenne ..... | 18,320 | 14,793 | 3,527 | 20,059 | 13,036 | 7,033 |

de la présence dans le sol d'une quantité d'azote, certes insuffisante, mais non négligeable pour une plante tributaire d'une fourniture hivernale. Ceci est confirmé par la réaction des traitements 5 et 6, derrière Trèfle blanc.

Dans le groupe avec 100 unités d'azote, c'est, par contre, le maïs de première année qui fournit les meilleurs rendements, grâce à une meilleure valorisation des précédents prairiaux, en présence de la fertilisation azotée, avec, toutefois, une réserve en ce qui concerne le comportement derrière les deux Dactyles (pur et graine). Ces deux précédents semblent avoir nui à l'efficacité de l'azote de l'engrais, ceci étant précisément surtout visible sur la culture d'été. La présence d'une forte quantité de matière organique pourrait y avoir été un frein à l'expression de rendements élevés : l'apport d'engrais azoté aurait été insuffisant pour couvrir la demande de la plante supérieure et de la microflore.

La conclusion évidente, à la suite de deux années de culture, concerne bien sûr l'effet bénéfique, en toutes circonstances, du précédent Trèfle blanc.

*Troisième année de mesure : 1967*

Elle a comporté une culture d'avoine et aboutit ainsi aux successions : (B. M. A.) et (M. B. A.) (tabl. 30 et fig. 10). La variance des rendements se décompose ainsi :

| Origine de la variation | Carrés moyens | F | P% |
|---|---|---|---|
| Successions | 578,21 | 602,32 | 0,1 |
| Précédent | 29,62 | 30,86 | 0,1 |
| Azote | 7,94 | 8,27 | 5 |

Comme dans l'étude des effets résiduels de la luzerne (JACQUARD et coll., 1969), c'est après la successions (M. B.) que l'on obtient les meilleurs rendements : 6,435 t/ha de M. S. (moyenne des traitements) contre 5,450 après (B. M.), soit un gain approximatif de 1 t de M. S. Ceci doit encore être attribué à la mauvaise utilisation de l'azote, en 1966, par le blé, du fait du décalage entre les besoins de la plante et la fourniture par le sol. On constate aussi un effet négatif des apports antérieurs d'azote :

| Fertilisation azotée | Précédents | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dactyle pur | Dactyle + Trèfle blanc | Trèfle blanc pur | Dactyle graine | M. B. O. | |
| | | | | | sans N | avec N |
| 0 | 6,12 | 6,25 | 6,36 | 5,94 | 5,47 | 5,84 |
| 100 | 5,92 | 6,03 | 6,10 | 5,98 | 4,56 | 5,81 |
| 0-100 | + 0,20 | + 0,22 | + 0,26 | — 0,04 | + 0,01 | + 0,03 |

Ceci pourrait être dû à l'inaptitude d'un sol recevant une fertilisation à compenser un arrêt des apports ; mais l'interprétation de ces résultats peut aussi s'exprimer de la façon suivante : en l'absence de fertilisation, le niveau d'équilibre dépend du

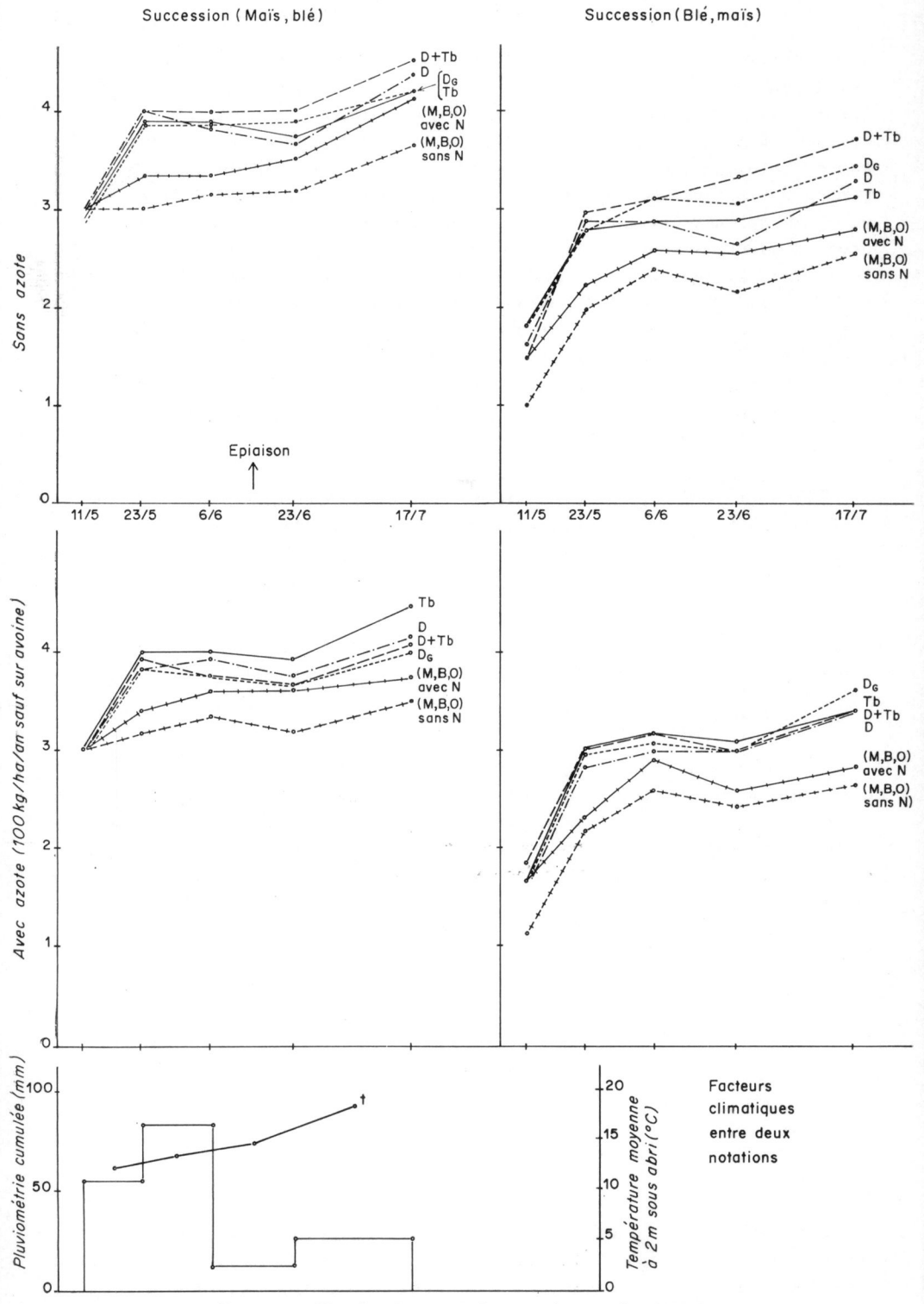



FIG. 10. — *Notation d'aspect de la végétation : avoine (1967).*

TABLEAU 30

*Rendements et exportation d'azote : avoine (1967)*

| Traitements | Doses d'azote (kg/ha) sur | | | Succession M + B | | | Succession B + M | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1re culture 1965 | 2e culture 1966 | Avoine 1967 | M. S. (t/ha) | N (kg/ha) | Teneurs en N (%) | M. S. (t/ha) | N (kg/ha) | Teneurs en N (%) |
| 1 D | 0 | 0 | 0 | 6,717 | 44,06 | 0,656 | 5,532 | 42,15 | 0,762 |
| 3 D + Tb | 0 | 0 | 0 | 6,614 | 48,87 | 0,739 | 5,903 | 39,90 | 0,676 |
| 5 Tb | 0 | 0 | 0 | 6,851 | 49,95 | 0,729 | 5,874 | 39,70 | 0,676 |
| 7 $D_g$ | 0 | 0 | 0 | 6,483 | 42,98 | 0,663 | 5,412 | 37,67 | 0,696 |
| 9 M. B. O. (sans N) | 0 | 0 | 0 | 6,042 | 43,86 | 0,726 | 4,905 | 33,16 | 0,676 |
| 11 M. B. O. (avec N) | 0 | 0 | 0 | 6,329 | 44,49 | 0,703 | 5,360 | 35,37 | 0,660 |
| 2 D | 100 | 100 | 0 | 6,315 | 43,51 | 0,689 | 5,532 | 41,60 | 0,752 |
| 4 D + Tb | 100 | 100 | 0 | 6,425 | 42,79 | 0,666 | 5,643 | 36,85 | 0,653 |
| 6 Tb | 100 | 100 | 0 | 6,615 | 44,52 | 0,673 | 5,592 | 36,35 | 0,650 |
| 8 $D_g$ | 100 | 100 | 0 | 6,436 | 43,31 | 0,673 | 5,533 | 39,45 | 0,713 |
| 10 M. B. O. (sans N) | 100 | 100 | 0 | 6,078 | 43,70 | 0,719 | 4,843 | 33,56 | 0,693 |
| 12 M. B. O. (avec N) | 100 | 100 | 0 | 6,315 | 47,11 | 0,746 | 5,319 | 39,84 | 0,749 |
| P.p.d.s. (0,05) | | | | NS | 2,83 | | NS | 3,10 | |
| Moyenne générale | | | | 6,435 | 44,93 | 0,698 | 5,450 | 37,96 | 0,696 |

précédent. L'action des traitements de la phase préparatoire se fait sentir au bout de trois ans de culture test. Or, on sait que plus on apporte d'azote, si le niveau des exportations est inférieur aux apports, plus il risque d'en rester (à la réserve près que la teneur des éléments organiques restant dans le sol soit suffisante pour ne pas trop « prélever ») : les mécanismes de minéralisation peuvent alors entrer en jeu. Il est donc important dans ce cas de vérifier le niveau des bilans, lesquels se situent ainsi, compte tenu de la phase préparatoire et en faisant la moyenne des successions blé-maïs et maïs-blé (ne différant la plupart du temps que de quelques kg/ha) :

| Fertilisation azotée | Précédents | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dactyle pur | Dactyle + Trèfle blanc | Trèfle blanc pur | Dactyle graine | M. B. O. | |
| | | | | | sans N | avec N |
| 0 | — 244 | — 395 | — 168 | — 110 | — 173 | — 9 |
| 100 | — 115 | — 276 | — 33 | + 7 | — 58 | + 135 |

Les bilans concernant le Dactyle-Trèfle blanc sont surestimés dans le sens négatif puisqu'ils ne tiennent pas compte de l'apport par la légumineuse. Ceci étant, les autres bilans varient de — 244 à + 135, et il n'y a aucune liaison entre ces variations et le rendement de l'avoine.

Comme l'effet négatif ne se manifeste qu'après prairie, on peut plus certainement l'imputer à un décalage dans la minéralisation des racines de Graminée et de Trèfle blanc, laquelle aurait pu être avancée par l'apport d'azote et ne plus se manifester ensuite. D'ailleurs, dans le groupe des cultures ayant reçu une fertilisation, il est difficile d'interpréter les différences entre précédents : elles sont très tamponnées pour les précédents prairiaux, et beaucoup moins pour les précédents « cultures annuelles » qui se sont sensiblement comportés de façon identique dans les deux groupes. Ceci souligne, à nouveau, l'interaction valeur-précédent × engrais azoté (tabl. 31).

Sur la figure 10, relative aux notations d'aspect, on constate que la différence de comportement de l'avoine dans les deux successions s'est manifesté très tôt sur la végétation.

## IV. — CONCLUSIONS

Au cours de ces trois années d'étude sur les effets résiduels de quelques précédents, un premier résultat intéressant est apparu : il s'agit de l'effet incontestable de l'azote comme variable explicative fondamentale du rendement global de l'appareil aérien, critère essentiel de comparaison.

Mais les implications de la physiologie propre à chaque culture de la phase de mesure sont aussi très importantes. Dans cette expérience particulière, les deux types de plantes utilisés sont à considérer séparément.

Le blé d'hiver, au cours d'une première période, caractérisée par un déroulement lent des échanges biologiques, est tributaire de la présence d'azote facilement accessible. Or, cette période, de novembre à février inclus, est déterminante pour l'expres-

TABLEAU 31

*Production de M.S. et exportations d'azote, globales, sur trois ans (1965 + 1966 + 1967)*

| Traitements | Apports d'azote | | | Succession (B. M. A.) | | | | Succession (M. B. A.) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1965 | 1966 | 1967 | Production de M. S. (t/ha) | Exportation d'azote (kg/ha) | Bilan (1) | Effet précédent (2) | Production de M. S. (t/ha) | Exportation d'azote (kg/ha) | Bilan (1) | Effet précédent (2) |
| 1 D ..... | 0 | 0 | 0 | 20,729 | 190 | — 190 | + 54 | 20,556 | 195 | — 195 | + 46 |
| 3 D + Tb ..... | 0 | 0 | 0 | 21,878 | 195 | — 195 | + 59 | 21,058 | 197 | — 197 | + 48 |
| 5 Tb ..... | 0 | 0 | 0 | 23,978 | 220 | — 220 | + 84 | 20,973 | 206 | — 206 | + 57 |
| 7 $D_g$ ..... | 0 | 0 | 0 | 20,626 | 187 | — 187 | + 51 | 19,610 | 182 | — 182 | + 33 |
| 9 M. B. O. (sans N). | 0 | 0 | 0 | 16,205 | 136 | — 136 | 0 | 16,498 | 149 | — 149 | 0 |
| 11 M. B. O. (avec (N. | 0 | 0 | 0 | 18,333 | 156 | — 156 | + 20 | 18,567 | 175 | — 175 | + 26 |
| 2 D ..... | 100 | 100 | 0 | 24,196 | 262 | — 62 | + 52 | 26,269 | 264 | — 64 | + 19 |
| 4 D + Tb ..... | 100 | 100 | 0 | 25,022 | 263 | — 63 | + 53 | 27,793 | 281 | — 81 | + 36 |
| 6 Tb ..... | 100 | 100 | 0 | 25,559 | 268 | — 68 | + 58 | 27,447 | 279 | — 79 | + 34 |
| 8 $D_g$ ..... | 100 | 100 | 0 | 25,059 | 268 | — 68 | + 58 | 27,026 | 267 | — 67 | + 22 |
| 10 M. B. O. (sans N). | 100 | 100 | 0 | 20,761 | 210 | — 10 | 0 | 24,296 | 245 | — 45 | 0 |
| 12 M. B. O. (avec N). | 100 | 100 | 0 | 21,786 | 231 | — 31 | + 21 | 25,769 | 257 | — 57 | + 12 |

(1) Apports d'azote — exportations d'azote = bilan
(2) Bilan d'un traitement — bilan du traitement (M. B. O.) sans N correspondant = effet précédent

sion du futur rendement global. L'autre période, concordant avec la fourniture d'azote par le sol, permet une certaine compensation des carences induites par la première, mais elle est très nettement moins influente quant au résultat final. En effet, c'est le nombre d'épis/plante et, par conséquent, au m² qui est le facteur principal de variation des rendements, et ce, dans une gamme importante, et c'est durant la première période qu'il est déterminé. Par la suite, l'action d'un supplément d'azote sera surtout marquée par la fabrication de paille.

Le maïs grain paraît réagir d'une toute autre manière. Apparemment, ses besoins au départ sont identiques à ceux du blé mais souffrent rarement d'une contrainte. Les effets différentiels apparaissent avant floraison, la demande en azote devenant alors maximum. A partir de ce stade, toute restriction de l'offre se répercute sur le rendement en grain. Il faut ajouter que cette culture est très fortement dépendante des périodes de pénurie en eau.

L'analyse séparée de l'action de chaque précédent, d'une part, et de leur apport d'azote, d'autre part, peut être réalisée à partir de la production de M. S. et des exportations d'azote, globales pour les trois années de mesure (tabl. 31, fig. 11).

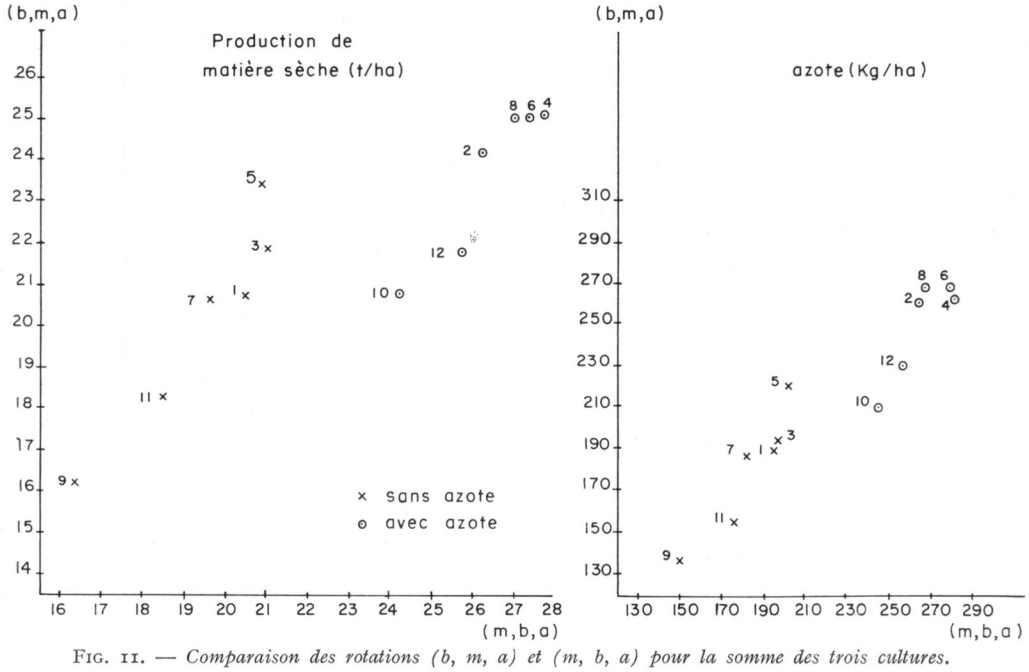



FIG. 11. — *Comparaison des rotations (b, m, a) et (m, b, a) pour la somme des trois cultures.*

### 1. *Quantités d'azote apportées par les différents précédents*

Mis à part le Trèfle blanc, qui, dès la première année, sur blé « fournit » une trentaine de kilogrammes d'azote supplémentaires, par comparaison aux autres précédents prairiaux, les estimations chiffrées que l'on peut faire donnent des résultats faibles. Ceci provient du fait, qu'en moyenne, pour les deux successions, le traitement 9, sans restitution de matière organique depuis 1962, correspond de 1965 à 1967 à un transfert de 142 kg/ha d'azote, pour l'ensemble des trois cultures, auxquels

s'ajoutent 68 kg de la phase préparatoire. La libération moyenne est donc de 35 kg d'azote/ha/an (ce qui correspond à peu de chose près à ce que l'on peut calculer à partir des données connues sur le rythme d'évolution de l'humus dans le sol).

On notera que dans cette succession « épuisante », les rendements en maïs, en 1966, étaient encore relativement élevés, ce que l'on peut interpréter comme une utilisation des reliquats d'azote laissés par le blé cultivé précédemment. Une compensation identique semble avoir joué en phase préparatoire lorsque des productions importantes de M. S. ont été obtenues sur une orge suivant un blé de comportement médiocre en 1963.

L'expression des fournitures d'azote au travers des bilans apports-exportations est évidemment peu précise, ne serait-ce que par le fait qu'on néglige ainsi la possibilité de pertes hivernales, lorsque la terre reste nue et surtout que l'on a attribué ici une efficacité de 100 p. 100 à l'azote de l'engrais, ce qui n'est jamais le cas. D'un point de vue strictement agronomique, il faut aussi tenir compte de ce qu'une tonne de matière sèche peut correspondre à des teneurs en azote différentes.

### 2. *Action particulière de chaque précédent prairial (sans apport d'azote)*

a) *Succession* (B. M.)

Vis-à-vis du *blé*, en *1965*, le *Trèfle blanc* autorise le meilleur rendement, ce qui permet d'attribuer à ce précédent une libération d'azote assimilable en plus grande quantité que pour les autres traitements. Les composantes du rendement le confirment. Il faut cependant se rappeler que sa disparition a débuté en juin 1964, ce qui a pu favoriser une minéralisation durant l'été, et entraîner la présence d'azote facilement disponible. Dans *l'association*, le Trèfle blanc était aussi en voie de disparition courant 1964, ceci pouvant avoir contribué à l'obtention d'un meilleur rendement que derrière les *Dactyles purs*. Ces derniers ont des effets identiques, indépendants de leur mode d'exploitation, *fourrage ou graine*, donc d'une différence possible de la quantité de racines ou de leur répartition dans le sol aussi bien que des bilans azotés en phase préparatoire.

A titre de comparaison, *la succession* (M. B. O.) *avec restitution de matière organique*, malgré l'effet perturbateur d'*Ophiobolus graminis*, conduit à un faible niveau des disponibilités en azote, attribuable à l'enfouissement de paille (même en présence d'une fertilisation azotée).

Le *maïs*, en *1966*, extériorise encore, derrière *Trèfle blanc*, l'existence d'un reliquat d'azote de 2e année, non négligeable. La tendance à une augmentation du rendement après *association*, notée sur blé, est confirmée, et peut être attribuée à la présence de Trèfle blanc. Ainsi, dans cette succession (et dans l'autre également), l'association paraît un bon précédent quelle que soit la culture suivante. Il s'agit d'une action très semblable à celle constatée sous forme d'augmentation du potentiel de rendement des cultures arables après retournement de prairies permanentes, souvent mal fertilisées en azote, donc riches en Trèfle blanc. *Les Dactyles* (*fourrage et graine*) ont des effets résiduels similaires sur maïs à ceux qu'ils eurent sur blé. Les rendements obtenus après la *succession* (M. B. O.) *avec restitution* l'apparentent au Dactyle pur.

b) *Succession* (M. B.).

Les parcelles ayant porté du *maïs* en *1965*, par opposition avec celles ayant du blé, sont restées nues durant l'hiver 1964-1965. Pourtant, on constate une manifestation des effets et un classement des précédents identiques à ceux que l'on retrouvera sur *maïs*, l'année suivante dans l'autre succession.

Par contre, le *blé* de *1966* accuse des différences. C'est après Dactyle pur que l'on aboutit au meilleur rendement, suivi de l'association, le Trèfle blanc n'arrivant qu'en troisième position. Ce classement est une conséquence logique de la libération tardive (deuxième année) d'azote par la matière organique du Dactyle. Mais d'une manière générale, les productions de M. S. sont très faibles et pourraient témoigner d'un épuisement atteignant l'ensemble des précédents. La culture de maïs, en 1965, ayant trouvé dans le sol les éléments nutritifs propres à la réalisation d'un rendement correct, celle du blé n'aurait plus bénéficié d'azote facilement disponible en quantité suffisante pour assurer un rendement normal. Les explications fournies précédemment (p. 34 et 39) montrent que ces rendements inférieurs de 1966 sont imputables en grande partie à une sous-nutrition azotée dont les effets peuvent être appréciés dans les tableaux 24 et 26 ; mais un autre mécanisme a joué aussi : l'attaque d'*Ophiobolus* (tabl. 25).

L'ordre de succession des cultures peut donc influencer notablement la nature des conclusions, surtout si l'on ne tient pas compte, lors de l'interprétation, des exigences propres à chacune d'elles.

En définitive, trois points essentiels sont à retenir :

1° *Il est nécessaire de mettre en place* la même année, au moins deux cultures-tests différentes pour chaque précédent, chacune étant complémentaire de la ou des autres quant à l'étude des effets résiduels.

2° *Ces effets de précédent* sont à envisager en eux-mêmes et dans leurs interactions éventuelles avec un apport d'azote, bien que ce soit un peu artificiel de décomposer ainsi ces effets, dont les divers aspects sont, en fait, assez liés, sinon totalement dépendants :

a) *effet propre du précédent* : Ce pourra être, comme dans l'expérience rapportée ici, une augmentation du potentiel du sol indéniable et attribuable à une fourniture d'azote minéralisable aux cultures. Bien sûr, cet effet bénéfique dépendra, non seulement de la nature du précédent, mais aussi de l'aptitude de la culture-test à permettre la mesure de cet effet (de par ses exigences). Cet effet résiduel sera aussi conditionné par de nombreux facteurs extérieurs, tels que la date de retournement, par exemple,

b) *effet du précédent en présence d'un apport d'azote destiné à couvrir les besoins*. Dans ce cas, la fertilisation devient prépondérante par rapport à tous les autres facteurs. Il existe néanmoins une action du précédent, mais elle est beaucoup plus atténuée qu'en l'absence d'azote. L'interaction précédent × azote permet parfois un gain supplémentaire : 5 p. 100 par exemple, de rendement en plus, en 1965, sur le maïs derrière l'association Dactyle-Trèfle blanc (traitement 4). Malgré cela, il semble bien que la hiérarchie des effets dans le contexte d'une fertilisation appropriée des cultures soit : dose d'azote, répartition de l'azote, précédent.

3° *La quantité d'azote apportée* : la réponse aux engrais pourrait être proportionnelle à un certain déséquilibre (déficit) temporaire du sol. La présence de quantités

importantes de matière organique, derrière Dactyle pur, entraîne en période d'été, une compétition entre la microflore et le maïs vis-à-vis de la fourniture d'azote (rendements inférieurs en 1965) qui n'apparaît pas en culture d'hiver. Il y a interaction entre les restitutions d'azote par minéralisation (effet précédent) et l'apport de l'engrais. Ce dernier marque moins rapidement dans un sol trop riche en matière organique. Cette dernière pourrait être considérée non pas comme une source d'éléments nutritifs, mais plutôt comme le siège d'un stockage intermédiaire, siège d'une sorte d'auto régulation de l'habitat édaphique, dans lequel les plantes pourraient puiser au fur et à mesure de leurs besoins et ceci *sans aucune discontinuité*. En fait, ceci n'est peut-être réalisé qu'avec une matière organique peu lignifiée, enfouie en quantité limitée et à un rythme régulier, alors que de gros apports (prairies de graminées pures) aboutiraient à l'établissement d'un nouvel équilibre, peut-être favorable temporairement pour le sol, mais sans intérêt du point de vue rentabilité des cultures, car sans effet sur le poste « engrais azoté ». Quant aux conséquences sur le maintien de la fertilité dans le temps, elles ne sont pas évidentes.

Ainsi, dans des sols de limon, bien équilibrés, comme le sont les argiles rouges à châtaignier du Poitou, toutes autres conditions restant favorables (disponibilité en autres éléments minéraux, alimentation en eau), c'est l'azote facilement utilisable qui détermine le rendement. Et la pratique d'apports d'engrais azotés sur les cultures aboutit à une mise à l'abri des plantes quant aux aléas toujours imprévisibles auxquels elles sont soumises du fait du milieu ambiant. Les différences de niveau des effets résiduels des précédents, estimés par les cultures suivantes, sont très atténuées et leur contribution au rendement devient secondaire, sinon négative (cas du Dactyle pur). L'explication la plus plausible est qu'une grande partie de l'azote résiduel est bloquée par la matière organique au détriment de la culture (c'est à la limite l'effet de l'enfouissement des pailles dans un sol où cette pratique est peu courante). On peut se demander si, en se plaçant dans les meilleures conditions de techniques culturales et en ayant pour objectif le rendement maximum, l'apport d'azote, sur des précédents à matière organique avec un rapport $\frac{C}{N}$ élevé, ne devrait pas être proportionnel à la quantité de résidus laissée au sol. Dans cette optique, les séquences de légumineuse pure ou associée (ici, Trèfle blanc) permettent de contrebalancer l'effet dépressif des graminées sur les rendements et de stabiliser dans le temps l'interaction précédent $\times$ azote des engrais à un niveau favorable.

Ceci étant, la fertilisation azotée ou autre apport destiné à couvrir les besoins, est prépondérante par rapport au précédent. L'effet de ce dernier est d'ailleurs souvent atténué par les engrais. Cependant, la non additivité des influences de l'un et l'autre facteur se manifeste parfois positivement (gain de rendement sur le maïs derrière l'association ici). Il n'en reste pas moins que la hiérarchie des effets, dans un contexte de cultures intensives, place le précédent en second rang.

*Reçu pour publication en décembre 1969.*

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier notre collègue M. REBISCHUNG pour sa contribution critique lors de la mise au point de ce texte.

## SUMMARY


### A STUDY OF THE RESIDUAL EFFECTS OF FODDER CROPS ON ARABLE CROPS

### II. — THE RESIDUAL EFFECTS OF VARIOUS PREVIOUS CROPS ON SEQUENCES OF ARABLE CROPS

The inclusion of temporary grassland in a rotation cycle can profoundly alter the characteristics of the soil and thus the yields. After a preparatory stage the experiment dealt with in this article allowed for a period of evaluation during which the rotations (maize, wheat, oats) and (wheat, maize, oats) were compared.

The six examples studied are :

1. Dactylis alone ;
2. Dactylis + white clover ;
3. White clover alone ;
4. Seed-bearing Dactylis ;
5. (Maize, wheat, barley) without nitrogenous fertilizer ;
6. (Maize, wheat, barley) with nitrogenous fertilizer ;

according to a factorial arrangement allowing two doses of nitrogen on the test crops.

The data obtained bore on the yield and its components and the appearance of the vegetation. There seems to be no connection between the dry matter yield of the wheat-maize or maize-wheat sequences and yield at the preparatory stage, or the nitrogen balance at this stage.

However, during three years of study on the residual effects of various prior crops, nitrogen seemed to be the primary explanatory variable. The estimated quantity of nitrogen deposited by different fodder crops is small. Comparison of the individual effects of each preceeding grass crop on test crops not fertilized by nitrogen, reveals the excellent yields obtained after white clover.

The need to put in, at least, two test crops with different biological cycles in the same year, is one of the essential points to be stressed.


## ZUSAMENFASSUNG


### UNTERSUCHUNG DER NACHWIRKUNGEN DER FUTTERKULTUREN AUF DIE BESTELLBAREN KULTUREN. II. — NACHWIRKUNGEN VERSCHIEDENER VORGÄNGE AUF SEQUENZEN VON BESTELLBAREN KULTUREN.

In der Fruchtfolge ist die Wechselwiesenwirtschaft instande, die Bodeneigenschaften und dadurch die Erträge wesentlich zu verändern. Der in dieser Untersuchung behandelte Versuch umfasste, nach einer vorbereitenden Phase, eine Schätzungsphase, wo die Fruchtfolgen (Mais, Weizen, Hafer) und (Weizen, Mais, Hafer) verglichen wurden.

Die sechs untersuchten Vorgänge sind :

1° Reine Knaulgras ;
2° Knaulgras + Weissklee ;
3° Reiner Weissklee ;
4° Samenträger-Knaulgras ;
5° (Mais, Weizen, Gerste) ohne Stickstoffsdüngung ;
6° (Mais, Weizen, Gerste) mit Stickstoffsdüngung,

gemäs einem faktoriellen Verfahren, das zwei Dosen Stickstoff auf die Probekulturen verteilt.

Die zusammengestellten Ergebnisse betrafen den Ertrag und seine Bestandteile, ferner das Aussehen der Vegetation. Es scheint als gäbe es keinen Zusammenhang zwischen den Ertrag an Trockensubstanzd er Fruchtfolgen (Weizen, Mais) oder (Mais, Weizen), und den Ertrag der vorbereitenden Phase, oder der Stickstoffsbilanz dieser Phase.

Im Laufe der drei Untersuchungsjahrem betreffend die Nachwirkungen der verschiedenen Vorgänge, erschien jedoch der Stickstoff als die ursprüngliche, explikative variabel Die durch die verschiedenen Futterkulturen gelieferte geschätzte Stickstoffmenge ist schwach. Der Vergleich der besonderen Einflüsse von jedem Wiesenvorgang auf die Testkulturen ohne Stickstoffdüngung, so hebt die vortrefflichen Erträge hervor, die in der Folge von Weissklee erhalten wurden.

Die Notwendigkeit, in ein und demselben Jahre, wenigstens zwei Probekulturen mit verschiedenen biologischen Zyklus aufzustellen soll hervorgehoben werden.

*Изучение остаточного действия кормовых культур на пропашные. Остаточное действие разных предшественников на последующие пропашные культуры.*

П. ЖАККАР, Г. МОННЬЕ, Л. КРУАЗЬЕ.

## РЕЗЮМЕ

Введение в севооборот временных лугов может коренным образом изменить характеристику почв, и тем самым — урожайность. Опыт о котором говорится в данной статье состоял из подготовительной фазы и последующей фазы оценки, в которой сравнивались различные последовательности пропашных, возделывавшихся после кормовых (кукуруза, пшеница, овес и ишеница, кукуруза, овес).

Изучались шесть различных предшественников :

1. — Ежа в чистом посеве; 2. — Ежа в смеси с белым клевером; 3. — Белый клевер в чистом посеве; 4. — Ежа семенная; 5. — последовательность кукуруза, пшеница, ячмень, без внесения азота; 6. — последовательность кукуруза, пшеница, ячмень, со внесением азота.

Опыт распологался в факториальном порядке и под испытывавшиеся культуры вносилось по две азотных подкормки.

Собиравшиеся данные касались урожаев и их составных, а также и внешнего вида растительности. Из опыта вытекает, что не существует как-будто никакого соотношения между продукцией сухого вещества различными последовательностями (кукуруза, пшеница, или пшеница, кукуруза), той-же продукцией подготовительной фазы и балансом азота этой последней.

Однако, после трехлетнего изучения остаточного действия разных предшественников, выяснилось что азот является главной об'яснительной переменной величиной. Оценка количеств азота внесенных при помощи запашки кормовых культур, дает цифры очень небольшие. Что-же касается сравнения действия каждого из испытанных луговых предшественников на последующие культуры возделывавшиеся без внесения азота, особенно крупные урожаи были получены после белого клевера.

Опыт показывает что главным условием получения хороших результатов является необходимость возделывания в том-же году по крайней мере двух культур-тестов с различным биологическим циклом.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BUI HUU TRI, 1968. Dynamique de la granulation du sol sous prairie. *Ann. Agron.*, **19**, 415-439.

BUI HUU TRI, 1969. Dynamique de la granulation du sol sous prairie. Thèse nº 10 3253, Paris.

DEFOSSE L., RIXHON L., 1968. Influence d'une série de précédents culturaux sur les piétins du froment (*Cercosporella herpotrichoïdes* Fron et *Ophiobolus graminis* Sacc.). *Parasitica*, **24**, 4, 107-20.

DOLING D. A., HEPPLE S., 1959. Occurence of take-all in cocksfoot and other grasses. *Plant Pathol.*, **8**, 2, 73-5.

JACQUARD P., CROISIER L., MONNIER G., 1969. Étude des effets résiduels des cultures fourragères sur les cultures arables : I. Effets résiduels de la luzerne sur le blé et le maïs. Ann. Agron., **20**, 371-433

MONNIER G., 1957. Influence des prairies temporaires sur la structure d'un sol de limon. *C. R. Acad.. Agric.*, 20 février.

MONNIER G., TURC L., JEANSON C., 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. Agron.*, **13**, 1, 55-63.

MONNIER G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.* Thèse de Docteur-Ingénieur, I. N. R. A., pp. 140.

VRKOC F., 1969. Influence de certaines cultures de légumineuses et de mélanges légumineuses-céréales sur les rendements des cultures suivantes. *Rost. Vyroba*, **15**, 42, 105-16.

ANNEXE I

*Calendrier cultural de la phase d'évaluation*

| Dates | Opérations culturales sur l'ensemble de l'essai | |
|---|---|---|
| | *Première année de mesure : 1965* | |
| 17-7-1964 | Récolte de l'orge ; enfouissement superficiel de la paille (traitements 11 et 12) | |
| 2-8-1964 | Dernière récolte de tous les traitements fourragers (herbe enlevée) | |
| 5-8-1964 | Déchaumage général au rotovator | |
| 21-9-1964 | Épandage de scories potassiques 14-14 (équivalent à 100 unités/ha de $P_2O_5$ et $K_2O$) | |
| 24-9-1964 | Labour | |
| | Sous-parcelle de blé | Sous-parcelle de maïs |
| 27-10-1964 | Hersage suivi de semis de *Cappelle* | |
| 23-11-1964 | Sur les traitements pairs : épandage d'ammonitrate 20 unités/ha (levée) | |
| 3-3-1965 | 30 unités/ha (tallage) | |
| 31-3-1965 | | Reprise du labour au cultivateur |
| 21-4-1965 | | Sur les traitements pairs : épandage d'ammonitrate 100 unités/ha |
| 27-4-1965 | 50 unités/ha (montaison) | Un passage de cultivateur |
| 10-5-1965 | | Hersage suivi de semis d' *I. N. R. A.* 260 |
| 4-8-1965 | Récolte | |
| 16-8-1965 | Déchaumage | |
| 20-10-1965 | | |
| 22-10-1965 | Épandage de scories potassiques 14-14 (équivalent à 100 unités/ha de $P_2O_5$ et $K_2O$) | |
| 25-10-1965 | Labour | |

ANNEXE I *(suite)*

| Dates | Opérations culturales sur l'ensemble de l'essai | |
|---|---|---|
| | *Deuxième année de mesure: 1966* | |
| | Sous-parcelle de maïs | Sous-parcelle de blé |
| 27-10-1965 | | Deux Hersages suivis de semis de *Cappelle* |
| 23-11-1965 | | Sur les traitements pairs : épandage d'ammonitrate 20 unités/ha (levée) |
| 22-2-1965 | | 30 unités/ha (tallage) |
| 15-3-1966 | Reprise du labour au cultivateur | |
| 20-4-1966 | | 50 unités/ha (montaison) |
| 21-4-1966 | Sur les traitements pairs : épandage d'ammonitrate 100 unités/ha | |
| 26-4-1966 | Reprise au cultivateur et hersage | |
| 27-4-1966 | Semis d' *I. N. R. A.* 260 | |
| 29-7-1966 | | Récolte |
| 22-8-1966 | | Déchaumage |
| 29-9-1966 | Récolte | |
| 24-11-1966 | Épandage de scories potassiques 14-14 (équivalent à 100 unités/ha de $P_2O_5$ et $K_2O$) | |
| 30-11-1966 | Labour | |
| | *Troisième année de mesure: 1967* | |
| 13-3-1967 | Deux passages de cultivateur | |
| 14-3-1967 | Semis d'avoine *Condor* | |
| 17-7-1967 | Récolte au stade grain laiteux | |

*Ann. agron.* 1970, **21** (1), 57-73.

# POTASSIUM LENTEMENT LIBÉRABLE ; QUELQUES ESSAIS DE BILANS CULTURAUX

C. DUTHION et Ruth GROSMAN

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherche de Dijon,*
*Institut national de la Recherche agronomique*

## RÉSUMÉ

L'étude cinétique de la libération de K par une solution contenant du tétraphénylborate de sodium n'a pas fait apparaître, pour le sol de limon argileux étudié, de distinction nette entre le potassium échangeable et un potassium plus lentement échangeable. La participation de ce dernier aux bilans de K a été mise en évidence dans différentes conditions culturales.

Dans un sol primaire, étudié par comparaison, le tétraphénylborate libère de grandes quantités de K aux dépens des minéraux primaires. Ceux-ci peuvent participer lentement à la nutrition des plantes.

## INTRODUCTION

Dans une note antérieure (DUTHION, 1966), nous avions exposé quelques résultats à propos de la technique d'extraction du potassium du sol par une solution contenant du tétraphénylborate de sodium. Nous avions pu montrer qu'il n'existait pas, dans le cas étudié, de distinction nette entre le potassium échangeable, au sens conventionnel, et un potassium plus lentement échangeable, dont la participation à la nutrition des plantes permettait d'expliquer des exportations très importantes.

L'intérêt présenté par ces résultats, que nous reprenons pour l'essentiel dans une partie du présent mémoire, nous a conduit à essayer d'en apprécier le caractère de généralité. Les premiers essais dans ce sens sont rapportés ici. Ils concernent seulement deux aspects de ce problème.

— possibilité d'utilisation et interprétation des bilans, à la suite de diverses conditions culturales qui ont entraîné des modifications sensibles de l'état du potassium du sol. Nous avons travaillé sur le sol étudié précédemment, qui constitue un exemple apparemment favorable ;

— application, par comparaison, à un sol qui contient encore des minéraux primaires riches en potassium (sol primaire selon G. W. ROBINSON, 1949).

## MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL ET TECHNIQUES ANALYTIQUES

### 1. *Les sols étudiés*

Les sols étudiés sont :

— un sol de limon argileux, reposant sur cailloutis alluvial, provenant du domaine expérimental d'Époisses (21 - Bretenière) ;

— un sol développé sur arène granitique (ferme du Monastère de la Pierre-qui-Vire, 89 - Saint-Léger-Vauban) résultant de l'altération d'un granite à deux micas. Dans des situations voisines, DEJOU (1967) a montré qu'on trouvait encore dans le sol environ 5 p. 100 de biotite et muscovite, d'une teneur approximative de 6 p. 100 en K, et 20 à 30 p. 100 de feldspaths potassiques qui renferment sensiblement 8 p. 100 de K.

Les principales caractéristiques de ces deux sols sont rassemblées dans le tableau 1.

TABLEAU 1

*Caractéristiques des sols étudiés*

| | 21-Bretenière | 89-La-Pierre-qui-Vire |
|---|---|---|
| Cailloux + graviers p. 100 sol | 2 | 40 |
| Argile p. 100 terre fine | 45,5 | 13,0 |
| Limon 2-20 μ p. 100 terre fine | 28,0 | 10,0 |
| Matière organique p. 100 terre fine | 3,5 | 7,0 |
| Capacité d'échange de cations me pour 100 g de terre fine | 25 | 15 |
| Taux de saturation p. 100 CEC | saturé | 41 |
| K total p. 100 terre fine | 1,5 | 4,1 |
| Capacité fixation p. 100 de K apporté — Voie humide | 33 | 13 |
| Capacité fixation p. 100 de K apporté — Voie sèche | 61 | 37 |
| Constitution de la fraction argileuse (1) | Kaol. — Rés. à 10 Å — int. > 10 Å | Kaol. — Rés. à 10 Å — verm. — Sm |

(1) Kaol : Kaolinite ; Rés. à 10 Å : réseaux à 10 Å ; Int. > 10 Å : Interstratifiés > 10 Å ; Verm. : Vermiculite ; Sm : Smectite.

### 2. *Matériel expérimental*

Les échantillons utilisés dans ce travail proviennent de dispositifs expérimentaux dont nous avons mis à profit l'existence. Ils sont présentés en détail ci-dessous.

#### 2. 1. *Sol de Bretenière.*

— *dispositif* A : il s'agit d'un essai d'irrigation sur dactyle, avec 4 répétitions, comportant des parcelles non irriguées (A 1 à 4) et des parcelles irriguées à l'optimum (A 5 à 8). Sa durée d'exploitation a été de trois ans (1961 à 1964).

— *dispositif* B : il a pour objet d'étudier (Mme E. LEFEBVRE-DROUET) l'incidence de la fumure potassique sur les métabolismes du dactyle. Il comprend des parcelles témoins (B 1, 2) et des parcelles qui ont reçu des quantités importantes de potassium en surface (B 3, 4). Sa durée d'exploitation a été de deux ans (1966, 1967).

Ainsi, à l'aide de ces deux dispositifs, nous disposions d'échantillons provenant de parcelles sur lesquelles ont été réalisées les conditions suivantes :

pas d'apport de K (B 1, 2) ;
apports compensant sensiblement les exportations (A 1 à 4) ;
exportations très supérieures aux apports de K (A 5 à 8) ;
apports de K très supérieurs aux exportations (B 3, 4).

Les prélèvements ont eu lieu suivant le découpage :

parcelles A : 0-15 cm, 15-30 cm de profondeur ;
parcelles B : 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm de profondeur.

Dans tous les cas, l'exploration racinaire maximale s'est située de façon apparente dans les 20 premiers centimètres du sol.

2. 2. *Sol de la Pierre-qui-Vire.*

D'une expérimentation sur la fertilisation potassique des prairies temporaires, nous avons analysé les échantillons provenant d'une parcelle témoin (PQV n° 1), d'une parcelle ayant reçu chaque année 150 kg/ha de $K_2O$ (PQV n° 3). L'essai a duré 9 années (1958-1967). Le profil a été subdivisé en un sol (0-10 cm) et un sous-sol (10-25 cm).

### 3. *Techniques analytiques*

— Capacité de fixation pour le potassium : elle a été déterminée par la méthode de VAN DER MAREL (SCHUFFELEN et VAN DER MAREL, 1955).

— Potassium total : dissolution par attaque sulfofluorhydrique.
— Potassium extrait par le tétraphénylborate.

Le mode opératoire que nous avons adopté diffère peu de celui des auteurs de la méthode (SCOTT, HUNZIKER et HANWAY, 1960 ; SCOTT et REED, 1962 ; SCHULTE et COREY, 1963) : extraction par une solution NaCl N contenant le tétraphénylborate de sodium à raison d'un milliéquivalent par gramme de sol avec un rapport sol/solution = 1/20.

Nous avons opéré à la température de 24°C maintenue à ± 0,5°C près, de façon à minimiser les effets de ce facteur sur les processus d'échange et de diffusion et sur la stabilité du tétraphénylborate.

Le tétraphénylborate de potassium est récupéré par dissolution dans l'acétone et filtration. Afin de réduire les possibilités de refixation au cours de cette opération, on ajoute avant dissolution 1 cm³ de $NH_4Cl$ N.

Le tétraphénylborate est détruit par chauffage à température modérée après acidification de la solution (SCHULTE et COREY, 1963).

Les produits de décomposition du tétraphénylborate sont ensuite séparés de la phase aqueuse par dissolution dans le chloroforme, préalablement débarrassé de son alcool stabilisant : par 10 puis 5 cm³ de chloroforme et séparation dans une ampoule à décanter.

La solution aqueuse est évaporée à sec. Le résidu est repris par 5 cm³ de HCl au 1/10 et filtré sur fiole jaugée de 50 cm³ (filtre bande bleue).

La composition des solutions des gammes-étalons est aussi voisine que possible de celle des solutions à analyser.

## RÉSULTATS

### 1. *Courbes d'extraction du potassium par le tétraphénylborate en fonction du temps de contact sol-solution*

Nous avons, dans tous les cas, limité le contact à 30 jours en raison de l'instabilité relative du tétraphénylborate.

La figure 1 représente quelques courbes caractéristiques correspondant au sol de Bretenière (terre fine < 2 mm). Elles concernent différents prélèvements :

— prélèvements 0-15 cm à la mise en place de l'essai (1961) sur les parcelles A 2 et A 6, pour lesquelles les courbes se trouvent confondues ;

— prélèvement 0-15 cm à la fin de l'essai (1964) sur la parcelle A 6 ;

— prélèvements 0-5 cm à la fin de l'essai (1967) sur les parcelles B 3 et B 4, pour lesquelles il est également possible de tracer une seule courbe.

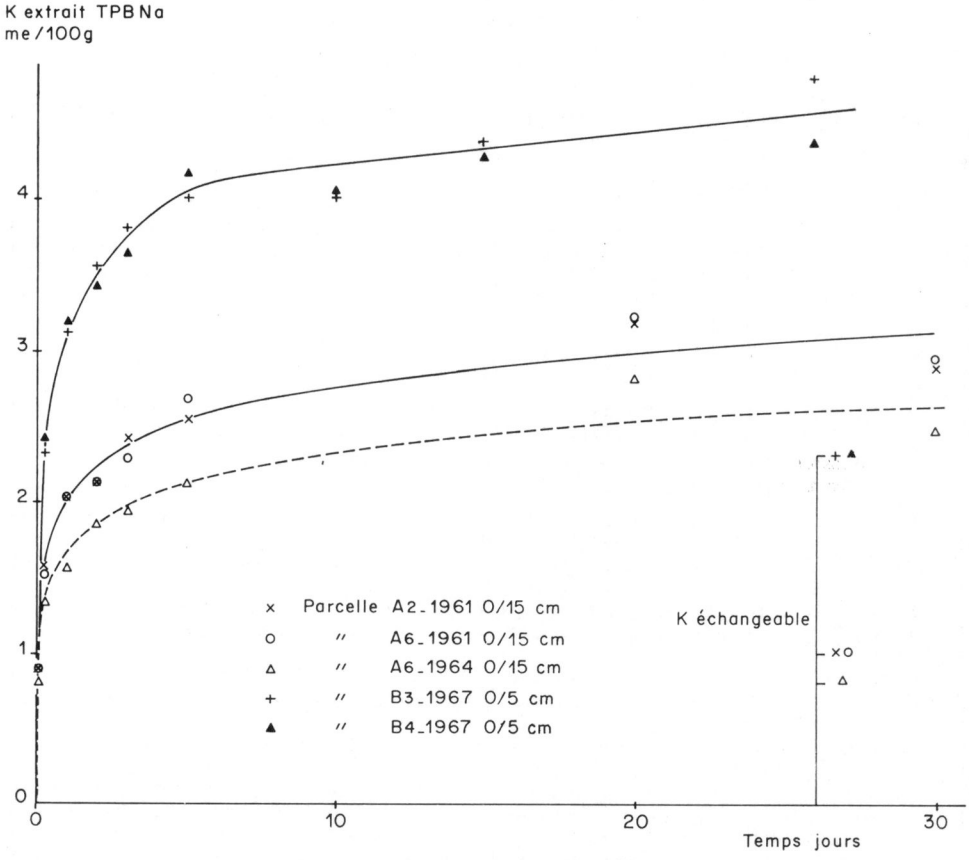



FIG. 1. — *Quantités de potassium libérées*
Sol de Bretenière

La figure 2 se rapporte au sol de la Pierre-qui-Vire. Elle donne les courbes d'extraction de K en fonction du temps pour les prélèvements effectués à la mise en place et à la fin de l'essai sur les parcelles 1 et 3. Deux séries de courbes ont été obtenues : l'une sur la terre fine < 2 mm, l'autre sur la terre broyée et passée au tamis 0,250 mm.

### 2. *Comparaison des bilans de potassium établis à partir des variations des teneurs en K échangeable ou en K extrait par le tétraphénylborate*

Des comparaisons de bilans ont été faites pour les trois dispositifs expérimentaux étudiés (tabl. 3, 4 et 5). Chacune des parcelles est traitée individuellement ; lorsque le nombre de répétitions est suffisant, une moyenne par traitement est calculée.

La comparaison porte sur les bilans obtenus à partir des variations :

— d'une part, des valeurs de K échangeable ;

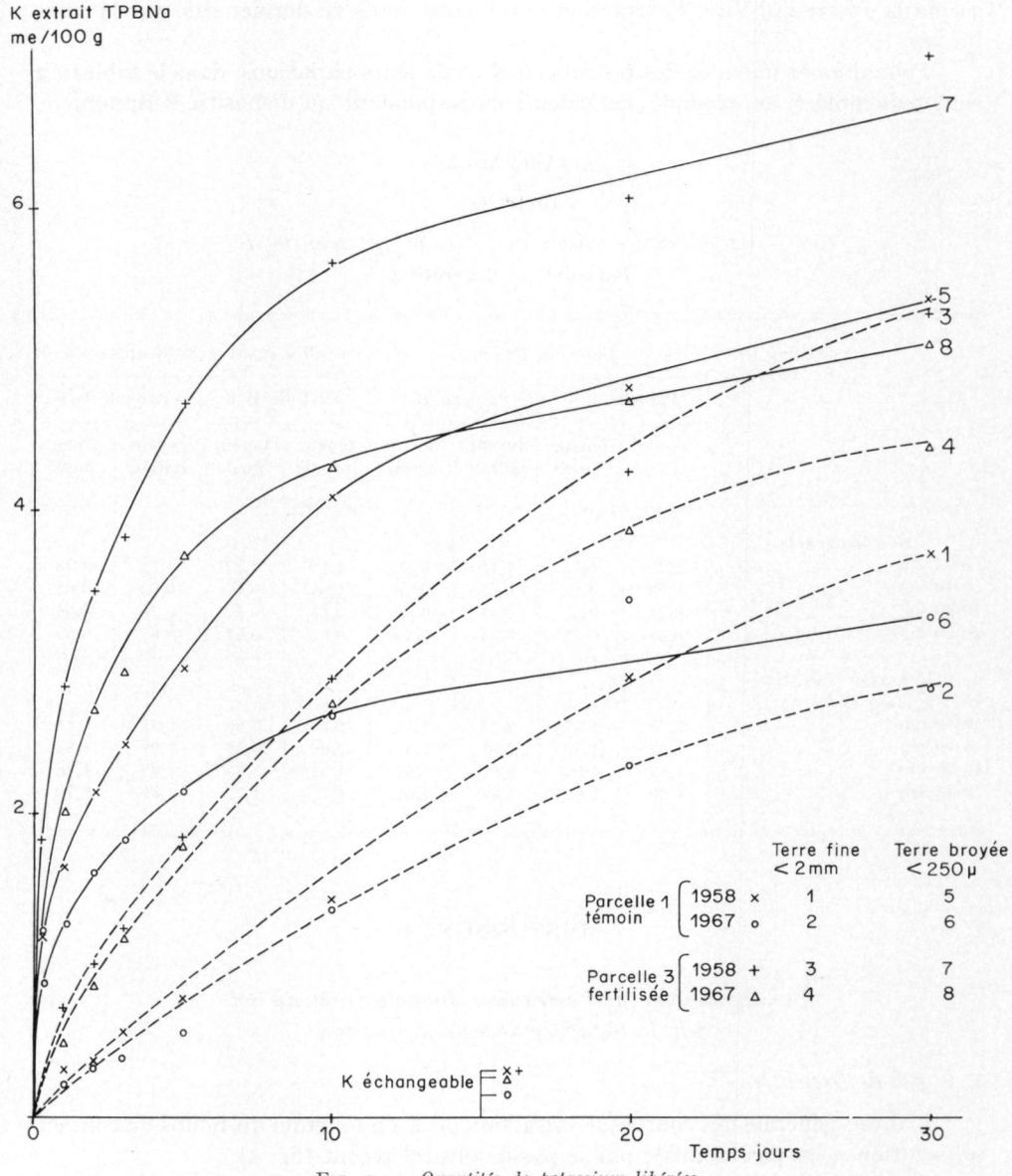



FIG. 2. — *Quantités de potassium libérées*
Sol de La Pierre-qui-Vire

— d'autre part des valeurs de K extrait par le tétraphénylborate. Le temps d'extraction est de 5 jours pour le sol de Bretenière ; il est de 10 et 30 jours pour le sol de la Pierre-qui-Vire, l'extraction étant faite, dans ce dernier cas, sur la terre broyée.

Pour donner une idée des teneurs en K et de leurs variations, dans le tableau 2 sont rassemblées, en exemple, les valeurs correspondant au dispositif B-Bretenière.

TABLEAU 2

Bretenière

*Variations des teneurs en potassium en méq/100 g*

Parcelles du dispositif B

| | Parcelles témoins | | | | Parcelles ayant reçu des apports de K | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Parcelle B 1 | | Parcelle B 2 | | Parcelle B 3 | | Parcelle B 4 | |
| | teneur initiale | teneur finale | teneur initiale | teneur finale | teneur initiale | teneur finale | teneur initiale | teneur finale |
| K échangeable | | | | | | | | |
| 0- 5 cm | 1,25 | 0,52 | 1,16 | 0,50 | 1,19 | 2,37 | 1,22 | 2,38 |
| 5-10 cm | 0,73 | 0,45 | 0,65 | 0,46 | 0,64 | 0,72 | 0,63 | 0,64 |
| 10-20 cm | 0,71 | 0,55 | 0,58 | 0,50 | 0,68 | 0,47 | 0,70 | 0,56 |
| 20-30 cm | 0,68 | 0,46 | 0,54 | 0,42 | 0,61 | 0,47 | 0,67 | 0,45 |
| K extrait TPB Na (5 jours de contact) | | | | | | | | |
| 0- 5 cm | 2,28 | 1,57 | 2,28 | 1,58 | 2,29 | 3,99 | 2,31 | 4,14 |
| 5-10 cm | 1,97 | 1,52 | 2,01 | 1,58 | 2,00 | 2,02 | 1,91 | 1,84 |
| 10-20 cm | 1,82 | 1,57 | 2,02 | 1,67 | 1,91 | 1,84 | 1,99 | 1,98 |
| 20-30 cm | 1,90 | 1,43 | 1,86 | 1,61 | 1,77 | 1,72 | 1,85 | 1,76 |

## DISCUSSION

### 1. *Dynamique de l'extraction du potassium du sol par le tétraphénylborate de sodium*

#### 1. 1. *Sol de Bretenière.*

L'allure générale des courbes d'extraction de K en fonction du temps de contact sol-solution n'est pas modifiée par le passé cultural récent (fig. 1).

Ces courbes montrent que l'on déplace, dans tous les cas, beaucoup plus que la quantité correspondant au potassium échangeable au sens usuel, quantité que des échanges successifs contre $NH_4^+$ ou $Na^+$ ne permettent pas d'augmenter de façon notable comme nous l'avons vérifié à l'aide de quelques essais. Il ne se manifeste, cependant, aucune discontinuité apparente au cours de l'extraction.

Il n'y a donc pas, du moins à l'échelle de nos mesures, de distinction nette entre le potassium dit échangeable et le reste du potassium extrait ; une fraction de celui-ci

est susceptible de diffuser avec une vitesse encore notable, à la condition néanmoins que l'activité des ions $K^+$ dans le milieu extérieur soit suffisamment abaissée. En effet, ce déplacement du potassium interfeuillet s'effectue probablement à la faveur de deux processus inverses mais simultanés de diffusion des ions $K^+$ et $Na^+$ dans l'espace interfoliaire (REED et SCOTT, 1962).

Il est cependant difficile de faire la liaison entre ces processus de diffusion et la mise en évidence d'une corrélation étroite ($r \geqslant 0{,}92$) entre les quantités de K extraites et le logarithme du temps $t$ de contact qui se traduit par l'existence, avec une forte probabilité, d'une relation linéaire (fig. 3), pour $t$ compris entre 1 et 720 heures (30 jours). Une constatation tout à fait similaire avait déjà été faite à propos d'une illite par SCOTT et REED (1962). Ces auteurs rapprochaient leur observation des résultats obtenus par MORTLAND (1958) sur la libération du potassium de la biotite par NaCl, en condition d'équilibre. Il faut donc admettre, pour qu'il y ait analogie

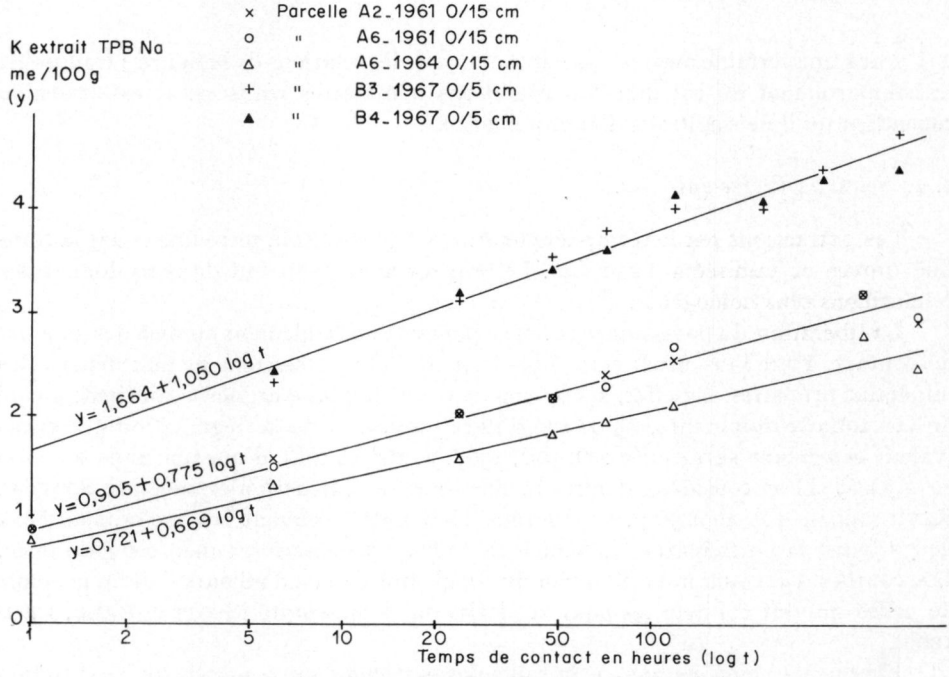



FIG. 3. — *Quantités de potassium libérées en fonction de log t*
Sol de Bretenière

réelle avec ce dernier cas, qu'un petit nombre d'ions $K^+$ reste dans la solution ; ceci peut être réalisé si la concentration en tétraphénylborate est insuffisante, ou si la présence d'ions d'autres espèces, provenant de la phase solide par échange ou dissolution, favorise la décomposition, lente dans nos conditions expérimentales, du tétraphénylborate de potassium formé.

Selon cette relation, la vitesse apparente de libération (le potassium échangeable étant précipité assez rapidement, en un temps de l'ordre d'une heure), à un instant $t$, est proportionnelle à l'inverse de $t$ ; elle décroît donc rapidement sans pourtant s'annuler.

La vitesse de libération, pour une même quantité de potassium restant dans les échantillons, réalisée au cours de l'appauvrissement par le TPBNa, devrait être indépendante de l'échantillon analysé. A l'aide des relations décrites figure 3, nous avons vérifié, pour les prélèvements 0-15 cm effectués en 1961 et 1964 sur la parcelle A 6, qu'il en est à peu près ainsi ; chaque couple de valeurs, dans le tableau ci-dessous, correspond à un stade hypothétique d'épuisement choisi arbitrairement, identique pour les deux prélèvements :

*Vitesse de libération en méq/100 g/heure* $\times 10^{-2}$

| Prélèvement 1961 | Prélèvement 1964 |
|---|---|
| — | — |
| 2,40 | 3,30 |
| 0,54 | 0,60 |
| 0,25 | 0,25 |

Dans une certaine mesure, il semble donc que les relations de la figure 3 traduisent le comportement du sol dans les conditions opératoires réalisées. Il est probable cependant qu'il ne s'agit que d'approximations.

1. 2. *Sol de la Pierre-qui-Vire.*

Les extractions par le tétraphénylborate ont porté sur la terre fine et sur la terre fine broyée et tamisée à 0,250 mm. Le broyage avait pour but de nous donner des échantillons plus homogènes.

La libération du potassium (fig. 2) se poursuit probablement au-delà des 30 jours de contact. Pour l'essentiel, cette libération se fait nécessairement aux dépens des minéraux primaires. En effet, si l'on convient que la phase argileuse contient, à côté de la kaolinite dominante, 15 p. 100 d'illite provenant de la dégradation des micas (valeur cependant surestimée : DEJOU, 1967, p. 167 et 185), d'une teneur de 6 p. 100 en $K_2O$ et si l'on considère, d'après la cinétique de l'extraction étudiée par SCOTT et REED (1962), que 40 à 50 p. 100 au plus du K initial peuvent être extraits au bout de 30 jours, la participation maximale de l'illite est d'environ 1 méq/100 g de terre. Les courbes d'extraction en fonction du temps présentent d'ailleurs l'allure générale de celles qui ont été décrites pour la biotite ou la muscovite (SCOTT et REED, 1962-1966).

L'influence, bien connue, de la taille des particules sur la marche de l'extraction est très nettement mise en évidence.

La représentation en coordonnées semi-logarithmiques pourrait se résoudre, si l'on cherche une certaine analogie avec le sol précédent, en deux demi-droites, pour les échantillons broyés. Cette constatation, qu'il convient cependant de faire avec quelque prudence, suggérerait que deux processus successifs de vitesses différentes, peut-être liés à des constituants distincts, peuvent intervenir dans la libération de K.

La très grande hétérogénéité du dispositif expérimental suffit à expliquer les différences importantes qui existent entre les courbes correspondant aux échantillons initiaux des parcelles 1 et 3 (courbes 1 et 3 ou 5 et 7 de la figure 2), ce qui justifie le traitement parcelle par parcelle de l'ensemble des résultats culturaux, dans les paragraphes suivants.

## 2. *Réserves de potassium*

De nombreuses expériences de cultures en vases de végétation ou au champ ont montré que les plantes sont capables d'extraire du sol des quantités de potassium très supérieures à celle que représente le potassium rapidement échangeable.

En condition normale de culture, la fraction du sol réellement exploitée par les racines peut être suffisamment faible (WIERSUM, 1961) pour que le potassium effectivement prélevé par les plantes dépasse de beaucoup le potassium échangeable contenu dans cette fraction de sol. Ce seul point de vue montre tout l'intérêt que l'on peut attacher à l'évaluation des réserves en potassium d'un sol.

Quelques tentatives (SCOTT et WELCH, 1961 ; SCHULTE et COREY, 1965) ont été faites pour apprécier la valeur de la technique d'extraction par le tétraphénylborate comme procédé d'évaluation des quantités de potassium qui deviendraient disponibles à plus ou moins long terme, par épuisement progressif du sol.

Nos résultats montrent en tout cas qu'il est peut-être plus facile d'apprécier par cette technique les variations d'ensemble des réserves, c'est-à-dire la résultante des transferts espaces interfeuillets ⇄ sites externes à la suite d'une exploitation culturale, et de mettre ainsi par exemple directement en évidence leur participation effective à la nutrition des plantes.

La figure 4 illustre bien cette possibilité, où sont reportées les courbes d'extraction de K par le tétraphénylborate pour les échantillons initial et final de la parcelle A 6 de Bretenière (courbes A) et ces mêmes courbes diminuées des valeurs respec-

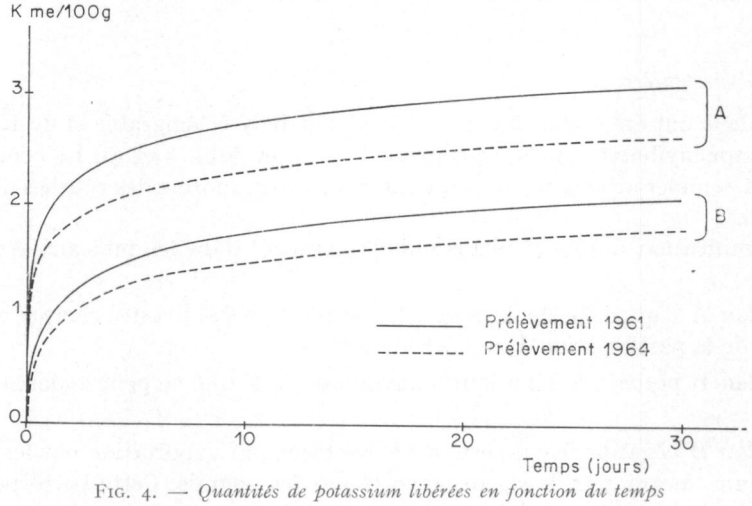



FIG. 4. — *Quantités de potassium libérées en fonction du temps*
Sol de Bretenière, parcelle A 6
Courbes A : potassium extrait par le TPBNa.
Courbes B : potassium extrait par le TPBNa-potassium échangeable.

tives de K échangeable (courbe B). La figure 2 en est elle-même un exemple très convaincant en ce qui concerne le sol de la Pierre-qui-Vire, puisque K échangeable y est relativement négligeable.

### 3. *Essais de bilans*

Les variations des teneurs en potassium extrait par le TPBNa traduisent-elles réellement les conditions qui se sont établies au cours des cultures ? Un contrôle peut nous en être fourni par l'intermédiaire des bilans de K.

La réciproque à cette proposition serait donc que, par l'intermédiaire de telles valeurs, il serait possible d'établir des bilans de K suffisamment approchés lorsque des libérations ou fixations interviennent.

#### 3. 1. *Précision sur les déterminations des teneurs en K.*

Avec trois déterminations analytiques, l'erreur sur la valeur moyenne de K extrait par le TPBNa est proche de ± 0,1 méq/100 g, très rarement supérieure.

Rapporté à l'hectare et pour une couche de 10 cm d'épaisseur, ce chiffre représente sensiblement 50 kg de K pour le sol de Bretenière, 30 kg pour le sol de la Pierre-qui-Vire. L'erreur sur une différence peut donc atteindre respectivement 100 et 60 kg, ce qui est évidemment beaucoup trop pour espérer un bilan précis.

Aussi avons-nous été amenés parfois à augmenter le nombre des déterminations, en particulier lorsqu'il y a une grande subdivision des profils comme dans le dispositif B de Bretenière.

En comparaison, l'erreur sur la moyenne de K échangeable peut n'être que de ± 0,01 méq/100 g.

Mais on peut craindre en réalité que la précision sur l'échantillonnage du sol soit encore inférieure à la précision analytique, malgré le soin apporté à cette opération.

#### 3. 2. *Sol de Bretenière.*

Les bilans ont été établis à partir des valeurs de K échangeable et de K extrait par le tétraphénylborate après un contact de 5 jours (tabl. 3 et 4). Le choix de ce temps peut sembler arbitraire, mais il tient compte de la forme des courbes d'extraction (fig. 1).

La signification des deux bilans qui apparaissent dans les tableaux est la suivante :

— Bilan A : quantité de K mise à la disposition des plantes compte tenu des apports et de la participation du sol selon l'analyse.

— Bilan B positif : le sol a fourni davantage de K que ne peut le déceler l'analyse.

— Bilan B négatif : il y a perte autrement que par exportation par les plantes du potassium fourni par le sol ou apporté par les engrais. Cette perte peut être une fixation plus énergique.

Lorsqu'il n'y a qu'une participation faible, ou même nulle, des réserves en K à l'alimentation des plantes, c'est-à-dire, par exemple, lorsque les apports de K compensent à peu près les exportations (parcelles A 1 à 4, tabl. 3), les bilans B obtenus de l'une ou l'autre façon ne sont pas sensiblement différents.

Par contre, si les exportations sont très supérieures aux apports (parcelles A 5 à 8, tabl. 3) ou s'il n'y a pas d'apport mais des exportations déjà importantes (par-

TABLEAU 3

Bretenière

*Dispositif expérimental A — Essai de bilan en kg K/ha*

| | Parcelles non irriguées | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Parcelle A 1 | | Parcelle A 2 | | Parcelle A 3 | | Parcelle A 4 | | Moyenne A 1 à 4 | |
| | Δ K échang (1) | Δ K extrait TPBNa (1) | Δ K échang (1) | Δ K extrait TPBNa (1) | Δ K échang (1) | Δ K extrait TPBNa (1) | Δ K échang (1) | Δ K extrait TPBNa (1) | Δ K échang (1) | Δ K extrait TPBNa (1) |
| Variations du K du sol | | | | | | | | | | |
| 0-15 cm | + 45,5 | — 76,0 | + 68,5 | + 152,5 | — 152,5 | — 221,0 | — 76,0 | — 221,0 | | |
| 15-30 cm | — 58,5 | — 51,0 | — 80,5 | — 183,0 | + 51,5 | + 22,0 | — 29,0 | + 29,5 | | |
| Σ (variations K du sol) | — 13,0 | — 127,0 | — 12,0 | — 30,5 | — 101,0 | — 199,0 | — 105,0 | — 191,5 | — 58,0 | — 137,0 |
| Apports K | 644,0 | 664,0 | 664,0 | 664,0 | 664,0 | 664,0 | 664,0 | 664,0 | 664,0 | 664,0 |
| Bilan A = Apports K − Σ (Δ K) | 677,0 | 791,0 | 676,0 | 694,5 | 765,0 | 863,0 | 769,0 | 855,5 | 722,0 | 801,0 |
| Exportations | 721,0 | 721,0 | 745,5 | 745,5 | 729,5 | 729,5 | 717,5 | 717,5 | 728,5 | 728,5 |
| Bilan B = Exportations − Bilan A | 44,0 | — 70,0 | 69,5 | 51,0 | — 35,5 | — 133,5 | — 51,5 | — 138,0 | 6,5 | — 72,5 |

TABLEAU 3 *(suite)*

| | Parcelles irriguées à l'optimum | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Parcelle A 5 | | Parcelle A 6 | | Parcelle A 7 | | Parcelle A 8 | | Moyenne A 5 à 8 | |
| | Δ K échang (1) | ∇ K extrait TPBNa (1) | Δ K échang (1) | Δ K extrait TPBNa (1) | Δ K échang (1) | Δ K extrait TPBNa (1) | Δ K échang (1) | Δ K extrait TPBNa (1) | Δ K échang (1) | Δ K extrait TPBNa (1) |
| Variations du K du sol | | | | | | | | | | |
| 0-15 cm | — 396,5 | — 732,0 | — 129,5 | — 411,5 | — 206,0 | — 610,0 | — 175,5 | — 450,0 | | |
| 15-30 cm | — 88,0 | — 183,0 | — 80,5 | — 146,5 | — 117,0 | — 132,0 | — 73,5 | — 176,0 | | |
| Σ (variations K du sol) | — 484,5 | — 915,0 | — 210,0 | — 558,0 | — 323,0 | — 742,0 | — 249,0 | — 626,0 | — 316,5 | — 710,0 |
| Apports K | 996,0 | 996,0 | 996,0 | 996,0 | 996,0 | 996,0 | 996,0 | 996,0 | 996,0 | 996,0 |
| Bilan A = Apports K — Σ (Δ K) | 1 480,5 | 1 911,0 | 1 206,0 | 1 554,0 | 1 319,0 | 1 738,0 | 1 245,0 | 1 622,0 | 1 312,5 | 1 706,0 |
| Exportations | 1 759,5 | 1 759,5 | 1 695,0 | 1 695,0 | 1 686,0 | 1 686,0 | 1 772,5 | 1 772,5 | 1 728,0 | 1 728,0 |
| Bilan B = Exportations — Bilan A | 279,0 | — 151,5 | 489,0 | 141,0 | 367,0 | — 52,0 | 527,5 | 150,5 | 415,5 | 22,0 |

(1) Δ K = quantité K finale — quantité K initiale.

TABLEAU 4

Bretenière

*Dispositif expérimental B — Essai de bilan en kg K/ha*

| | Parcelles témoins | | | | Parcelles ayant reçu des apports de K | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Parcelle 1 | | Parcelle 2 | | Parcelle 3 | | Parcelle 4 | |
| | Δ K échang. (1) | Δ K extrait TPBNa (1) | Δ K échang. (1) | Δ K extrait TPBNa (1) | Δ K échang. (1) | Δ K extrait TPBNa (1) | Δ K échang. (1) | Δ K extrait TPBNa (1) |
| Variations du K du sol | | | | | | | | |
| 0- 5 cm | — 185,5 | — 180,5 | — 167,5 | — 178,0 | + 300,0 | + 431,0 | + 295,0 | + 465,0 |
| 5-10 cm | — 71,0 | — 114,5 | — 48,5 | — 109,5 | + 21,0 | + 5,0 | + 2,5 | — 17,5 |
| 10-20 cm | — 80,0 | — 124,5 | — 40,0 | — 174,5 | — 100,0 | — 32,0 | — 71,0 | — 2,5 |
| 20-30 cm | — 107,5 | — 229,5 | — 58,5 | — 122,0 | — 68,5 | — 15,5 | — 107,5 | — 44,0 |
| Σ (Variations K du sol) | — 444,0 | — 649,0 | — 313,5 | — 584,0 | + 152,5 | + 388,5 | + 119,0 | + 398,0 |
| Apports K | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 162,0 | 1 162,0 | 1 162,0 | 1 162,0 |
| Bilan A = Apports K — Σ (Δ K) | 444,0 | 649,0 | 313,5 | 584,0 | 1 009,5 | 773,5 | 1 043,0 | 764,0 |
| Exportations (2) | 593,5 | 593,5 | 590,0 | 590,0 | 634,0 | 634,0 | 659,5 | 659,5 |
| Bilan B = Exportations — Bilan A | 149,5 | — 55,5 | 276,5 | 6,0 | — 375,5 | — 139,5 | — 383,5 | — 104,5 |

(1) Δ K = quantité K finale — quantité K initiale.

(2) Il n'a pas été tenu compte d'une 4e coupe de régularisation en fin de première année d'exploitation.

celles B 1-2, tabl. 4) l'utilisation des valeurs de K extrait par le TPBNa rapproche davantage d'un bilan équilibré.

Après des apports de K répétés et importants qui ont entraîné des fixations (parcelles B 3-4, tabl. 4), l'amélioration du bilan par l'emploi de TPBNa est également grande. De telles données montrent bien qu'une partie au moins du potassium fixé reste disponible à l'égard des plantes. Dans ce cas particulier, on peut remarquer encore que le K apporté en couverture est resté dans la couche superficielle du sol.

3. 3. *Sol de la Pierre-qui-Vire.*

Dans le bilan, apparaissent seulement les variations des quantités extraites. Aussi avons-nous utilisé les valeurs de K TPBNa correspondant aux échantillons broyés, plus homogènes, pour lesquels l'extraction est plus rapide. Le choix du temps de contact n'en est pas moins délicat ; c'est pourquoi nous avons fait nos calculs à partir des valeurs obtenues à deux temps différents : 10 jours, pour lequel on observe un certain ralentissement de l'extraction, et 30 jours, temps le plus long.

On a utilisé, pour K échangeable, les valeurs obtenues dans les conditions habituelles. Ceci ne modifie pas la signification des comparaisons qui sont faites, même si le broyage augmente apparemment K échangeable (par ex. : parcelle 1, 1958-1967, échantillons non broyés : 0,28-0,16 ; échantillons broyés : 0,57-0,47 méq/100 g).

TABLEAU 5

La Pierre-qui-Vire

*Essai de bilan en kg K/ha*

| | Parcelle témoin | | | Parcelle ayant reçu des apports de K | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ΔK échang. (1) | ΔK extrait TPBNa (1) | | ΔK échang. (1) | ΔK extrait TPBNa (1) | |
| | | 10 jours contact | 30 jours contact | | 10 jours contact | 30 jours contact |
| Variations du K du sol | | | | | | |
| 0-10 cm ..... | — 39,5 | — 414,0 | — 583,0 | — 5,5 | — 380,0 | — 438,0 |
| 10-25 cm ..... | — 53,0 | + 94,0 | — 37,0* | — 53,0 | — 37,0 | — 122,0* |
| Σ (ΔK) ..... | — 92,5 | — 320,0 | — 630,0 | — 58,5 | — 417,0 | — 560,0 |
| Apports K ..... | 150,0 | 150,0 | 150,0 | 1 126,0 | 1 126,0 | 1 126,0 |
| Bilan A = Apports K — Σ (ΔK) .. | 242,5 | 470,0 | 780,0 | 1 184,5 | 1 543,0 | 1 686,0 |
| Exportations ..... | 828,0 | 828,0 | 828,0 | 1 530,0 | 1 530,0 | 1 530,0 |
| Bilan B = Exportations — Bilan A . | 585,5 | 358,0 | 48,0 | 345,5 | — 13,0 | — 156,0 |

(1) ΔK = quantité K finale — quantité K initiale.

* K extrait après 30 jours n'ayant pas été déterminé, on a utilisé le chiffre correspondant à 20 jours de contact.

Les résultats sont résumés dans le tableau 5. Bien qu'il y ait une probabilité élevée pour qu'un lessivage assez important se soit produit, il n'a pu être tenu compte des quantités de K exportées par cet entraînement.

L'utilisation des valeurs de K extrait par le TPBNa permet donc d'améliorer le bilan par rapport à celui que l'on obtient à partir des teneurs en K échangeable. Bien que le bilan soit encore peu précis il permet cependant de mettre en évidence la participation du potassium contenu dans les minéraux primaires du sol à l'alimentation des plantes. Cette participation est cependant insuffisante en cas d'intensification des cultures, pour subvenir seule aux besoins des plantes qui, dans ces conditions, manifestent des signes très nets de carence (MÉRIAUX *et al.*, 1968).

## CONCLUSION

L'application à un sol de limon argileux de la technique d'extraction du potassium par une solution contenant du tétraphénylborate de sodium montre l'existence, à côté du K échangeable au sens conventionnel, d'une quantité importante d'un potassium plus lentement échangeable, sans qu'une distinction nette entre ces deux formes soit perceptible.

Cette technique ne permet peut-être pas d'apprécier très exactement les réserves en potassium d'un sol (BLANCHET et BOSC, 1967), mais elle donne dans le cas étudié une bonne estimation de leurs variations d'ensemble, qui sont la résultante de mouvements éventuels de libération et fixation, les uns ou les autres pouvant devenir prédominants.

Elle montre bien que les plantes sont capables d'absorber le potassium lentement échangeable en quantité importante dont il est nécessaire de tenir compte dans l'étude des bilans.

Dans le cas d'un sol développé sur arène granitique, elle nous a permis de confirmer la participation des minéraux primaires à la nutrition potassique des plantes.

Il faut cependant bien se garder de généraliser ces premiers résultats, bien qu'encourageants. En effet, dans une étude en cours, nous avons déjà mis en évidence la grande variabilité des caractéristiques de la libération de K par le tétraphénylborate d'un sol à l'autre, rendant sans doute délicate l'utilisation de telles données dans un certain nombre de situations.

*Reçu pour publication en janvier 1970.*

## SUMMARY

POTASSIUM THAT CAN BE RELEASED SLOWLY.
EXPERIMENTS WITH CULTIVATION LEVELS

The kinetic study of the release of potassium through a solution containing sodium tetraphenylboron has not demonstrated, for the clayey loam soil that was studied, any clear distinction between exchangeable potassium and a more slowly exchangeable potassium. The part played by the latter in the levels of potassium was demonstrated in different cultivation conditions.

In a primary soil, studied by comparison, tetraphenylboron releases large quantities of potassium at the expense of primary minerals. These can play a gradual part in the nutrition of plants.

## ZUSAMENFASSUNG

### LANGSAMES BEFREIEN VON KALIUM. EINIGE VERSUCHE VON BODENBEWIRTSCHAFTUNGSBILANZEN

Die kinetische Untersuchung des Befreiens von Kalium durch eine Kaliumtetraphenylborat enthaltende Lösung hat im Falle des untersuchten schlammig-tonigen Bodens, keine klare Unterscheidung zwischen dem austauschbaren Kalium und einem langsamer austauschbaren Kalium feststellen lassen. Die Teilnahme des letzteren an den K-Bilanzen wurde in verschiedenen Anbauverhältnissen nachgewiesen.

In einem zwecks Vergleich untersuchten Primärboden, macht das Tetraphenylborat grosse Mengen von K auf Kosten der primären Mineralien frei. Diejenigen können sich an der Ernährung der Pflanzen langsam beteiligen.

*Медленно-освобождаемый калий. Попытки подведения балансов культур.*

Г. ДЮТИОН, Руфь ГРОСМАН.

## РЕЗЮМЕ

Изучение кинетики освобождения калия, проведенное на глинистом суглинке при помощи раствора содержавшего тетрафенил-борат натрия, не выявило явного различия между быстро и более медленно-обменным калием. Участие этого последнего в балансах калия было продемонстрировано авторами в разнообразных условиях культуры.

В первичной почве изученной для сравнения, тетрафенил-борат натрия освобождает за счет первичных минералов большие количества калия, которые могут таким образом постепенно принимать участие в питании растений.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BLANCHET R., BOSC M., 1967. Bilans de potassium et alimentation potassique des plantes en présence de rétrogradations et de libérations d'ions $K^+$ non échangeables. *Ann. agron.*, **18** (6), 601-621.

DEJOU J., 1967. L'altération des granites à 2 micas du Massif de la Pierre-qui-Vire. *Ann. agron.*, **18**, (2), 145-201.

DUTHION C., 1966. Réserve de potassium lentement libérable d'un sol de limon. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 90-97.

MÉRIAUX Suzanne, LIBOIS A., GROSMAN Ruth, 1968. Nouvelles données sur la fertilisation potassique des plantes fourragères en sol granitique. *Ann. agron.*, **19** (4), 459-471.

MORTLAND M. M., 1958. Kinetics of potassium release from biotite. *Soil. Sci. Soc. amer. Proc.*, **22**, 503-508.

REED M. G., SCOTT A. D., 1962. Kinetics of K release from biotite and muscovite in sodium tetraphenylboron solutions. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **26**, 437-444.

REED M. G., SCOTT A. D., 1966. Chemical extraction of potassium from soils and micaceous minerals with solutions containing sodium tetraphenylboron. IV. Muscovite. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **30**, 185-188.

ROBINSON G. W., 1949. *Soils. Their origin, constitution and classification*, 64 p., Th. Murby and Co.

SCHUFFELEN A. C., VAN DER MAREL H. W., 1955. Potassium fixation in soils. *Potassium Symp.*, 157-201.

SCHULTE E. E., COREY R. B., 1963. Flame photometric determination of potassium precipitated in soils as potassium tetraphenylboron. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **27**, 358-360.

SCHULTE E. E., COREY R. B., 1965. Extraction of potassium from soils with sodium tetraphenylboron. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **29**, 33-35.

SCOTT A. D., HUNZIKER H. H., HANWAY J., 1960. Chemical extraction of potassium from soils and micaceous minerals with solutions containing sodium tetraphenylboron I. Preliminary experiments. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **24**, 191-194.

SCOTT A. D., REED M. G., 1962. Chemical extraction of potassium from soils and micaceous minerals with solution containing sodium tetraphenylboron. II. Biotite. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **26**, 41-45. III. Illite. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **26**, 45-48.

SCOTT A. D., WELCH L. F., 1961. Release of non exchangeable soil potassium during short periods of cropping and sodium tetraphenylboron extraction. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **25**, 128-131.

WIERSUM L. K., 1961. Utilization of soil by the plant root system. *Plant and soil*, **15**, 189-192.

*Ann. agron.* 1970, **21** (1), 75-94.

# ÉTUDE PAR ANALYSE THERMIQUE DIFFÉRENTIELLE DES SUBSTANCES ORGANIQUES EXTRAITES DE SOLS HYDROMORPHES CALCIQUES

Thérèse DUPUIS, P. JAMBU et J. DUPUIS

*Laboratoire de Pédologie,*
*Faculté des Sciences, 86 - Poitiers*

## RÉSUMÉ

Les auteurs étudient le comportement de divers composés humiques (bitumes, acides fulviques, acides hymatomélaniques, acides humiques bruts ou affinés extraits de tourbes et d'anmoors calciques) sous l'action de la chaleur à l'aide de l'analyse thermique différentielle, en atmosphère inerte et oxydante.

Les stades de pyrolyse mis en évidence par les courbes d'A. T. D. sont précisés à l'aide de la spectrographie d'absorption infrarouge.

Les procédés d'extraction et d'affinage utilisés se traduisent par des modifications de la courbe d'A. T. D. En particulier, il existe un rapport étroit entre l'affinage (traduit par la teneur en cendres) et la stabilité thermique des substances.

En comparant les courbes d'A. T. D. des acides humiques et fulviques bruts ou affinés avec celles de produits très purs auxquels on associe divers constituants minéraux (calcium, fer, phosphate, argile), on peut caractériser un certain nombre de complexes organo-minéraux. Ces produits existent en diverses proportions dans les composés humiques extraits des différentes stations d'une séquence d'assèchement. Il semble donc que la courbe d'A. T. D. puisse permettre de caractériser les humus formés dans diverses conditions écologiques.

## I. — INTRODUCTION

Dans une publication antérieure, T. DUPUIS et P. JAMBU (1969) ont étudié par spectrographie infrarouge la structure des acides fulviques et humiques extraits de tourbes et d'anmoors calciques provenant d'une pédo-séquence d'assèchement du Marais Poitevin décrite par P. JAMBU (1968).

Les échantillons étudiés se rapportent aux horizons organiques suivants :

CO : Anmoor calcique asséché sur argile marine flandrienne. Courçon-d'Aunis (Charente-Maritime). Prairie.

LG : Anmoor calcique sur argile marine flandrienne. La Grève-sur-le-Mignon (Charente-Maritime). Prairie humide sous peupliers.

MA : Anmoor sur alluvions fluviatiles modernes avec calcaire de nappe. Mauzé-sur-le-Mignon (Deux-Sèvres). Prairie humide.

AM : Anmoor longuement submergé sur alluvions fluviatiles modernes avec calcaire de nappe. Amuré (Deux-Sèvres). Prairie humide.

$MZ_1$ : (surface), $MZ_2$ (niveau intermédiaire), $MZ_3$ (profondeur) d'un profil de tourbe calcique à roseaux. Le Mazeau (Vendée). Prairie humide.

Nous nous proposons ici d'en préciser la structure en examinant, à l'aide de l'analyse thermique différentielle, le comportement sous l'action de la chaleur des substances organiques extraites.

Selon la nomenclature généralement employée, nous avons notamment distingué les *bitumes*, directement extraits par le mélange éthanol-benzène (ainsi que leurs constituants *cires* et *résines* extraits par l'éther et l'éthanol) et les *matières humiques* dissoutes par une liqueur alcaline. Celles-ci sont ensuite séparées en plusieurs fractions d'après leur solubilité en milieu acide : *acides humiques « bruts »* (précipités de la liqueur d'extraction par acidification) et *acides fulviques* (restés en solution après cette acidification). Les acides humiques bruts sont à leur tour fractionnés en *acides hymatomélaniques* solubles dans l'éthanol (1) et en *acides humiques* proprement dits, insolubles dans ce même alcool.

Les courbes d'analyse thermique différentielle ont été réalisées à l'aide du microanalyseur B. D. L., type $M_1$, équipé d'un enregistreur Kipp et Zonen micrograph $BD_1$, qui permet de travailler avec des prises d'essai de quelques milligrammes. Nous avons chauffé les substances soit à l'air, soit avec balayage de la chambre par un courant d'oxygène de 90 ml/mn. Quelques échantillons ont été traités dans un courant d'azote de même débit. Dans le cas d'un chauffage à l'air ou sous courant d'oxygène, la substance organique est diluée par de l'alumine calcinée dans la proportion de 1 à 10. Dans le cas du chauffage sous courant d'azote, la substance est placée pure dans le creuset et celui-ci est muni d'un couvercle. La vitesse de chauffe est d'environ 500°C à l'heure.

Pour les substances étudiées, nous avons enregistré aussi le spectre d'absorption infrarouge entre 4 000 et 600 $cm^{-1}$, soit après inclusion dans des pastilles de bromure de potassium, soit après dépôt sur lame de sel gemme (dans le cas des produits solubles dans l'éthanol ou l'éther). De plus, nous avons déterminé leur teneur en cendres minérales.

Pour suivre les étapes de la pyrolyse de ces substances, nous avons sélectionné un certain nombre d'échantillons dont les courbes d'A. T. D. présentent des accidents bien individualisés. Nous les avons ensuite chauffés soit sous courant d'azote, soit sous courant d'oxygène sans mélange d'alumine (2) jusqu'à des températures intermédiaires entre les différents pics. Nous avons alors déterminé la perte de poids, puis effectué sur les produits résiduels le spectre d'absorption infrarouge.

Les courbes d'A. T. D. que nous avons obtenues sur les divers produits sont comparables à celles qu'ont données des auteurs tels que PAULIK et WELTNER (1958), MITCHELL (1960) ou SCHARPENSEEL, KÖNIG et MENTHE (1964). D'après MITCHELL, qui cite les travaux de GRIMSHAW et ROBERTS et ceux de WADDAMS et GRAY, la courbe de pyrolyse dans un courant d'oxygène des tourbes, lignites et charbons bitumineux présente un premier crochet exothermique vers 300-320°C, qui serait dû au départ de la fraction volatile des composés riches en groupements oxygénés (OH, COOH), puis un second pic exothermique vers 450-470°C, qui correspondrait à l'oxydation du carbone « fixe » non volatil.

(1) Le traitement direct des sols calciques par l'éthanol, sans acidification préalable, ne semble extraire que de faibles quantités d'acides hymatomélaniques.

(2) Dans le cas du chauffage sous courant d'oxygène, les courbes d'A. T. D. présentent la même allure que la substance soit pure ou diluée dans l'alumine calcinée, mais dans le dernier cas, la température des pics est plus élevée d'une dizaine de degrés centigrades.

## II. — BITUMES

Nous avons extrait les bitumes en traitant 5 à 10 g de terre brute pendant 5 heures dans un appareil de Soxhlet par 200 ml d'un mélange éthanol-benzène (35/65).

Nous avons aussi examiné les fractions obtenues par agitation prolongée de la terre à température ordinaire d'abord dans l'éther éthylique, puis dans l'éthanol.

Tous les produits obtenus sont gommeux, de teinte blanchâtre, jaunâtre ou verdâtre, d'odeur très prononcée, exempts de cendres minérales.

Leur spectre d'absorption infrarouge montre l'existence de longues chaînes aliphatiques, de noyaux aromatiques et de fonctions carboxyliques (aliphatiques et aromatiques) estérifiées. Cependant, leur structure est beaucoup plus aliphatique que celle des substances humiques étudiées plus loin.

La courbe d'A. T. D. d'un bitume chauffé sous courant d'oxygène (fig. 1 *a*) montre après le phénomène endothermique général de départ un unique pic exothermique très intense qui débute dès 170°C et culmine vers 290°C.

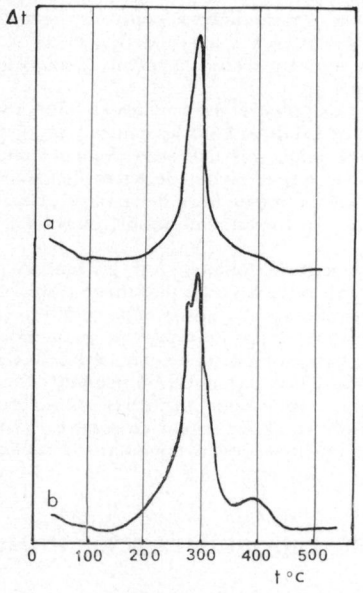



FIG. 1. — *Courbes d'A. T. D. de bitumes*
*a*) $MZ_3$ (Extraction éthanol-benzène)
*b*) $MZ_1$ (Extraction éther éthylique)

La courbe d'A. T. D. (fig. 1 *b*) de l'extrait à l'éther (cire) chauffé sous courant d'oxygène montre un premier pic exothermique très intense (qui débute vers 200°C et culmine vers 300°C) suivi d'un second de faible intensité (maximum vers 420°C). La courbe obtenue avec l'extrait à l'éthanol est très semblable mais semble traduire l'existence de produits supplémentaires (acides hymatomélaniques) en proportion plus importante. L'étude du spectre d'absorption infrarouge confirme l'existence de mélange.

De toute manière, la courbe d'A. T. D. souligne le caractère relativement volatil de ces produits.

## III. — EXTRACTION, TRAITEMENT ET FRACTIONNEMENT DES MATIÈRES HUMIQUES

Les matières humiques sont extraites du sol par une solution de pyrophosphate de sodium 0,1 M (pH 9,8). L'acidification du liquide d'extraction jusqu'à pH 1 par l'acide chlorhydrique permet de séparer les *acides humiques bruts* qui floculent, des *acides fulviques bruts* qui demeurent en solution.

Les acides humiques bruts sont séparés par centrifugation, puis remis en suspension dans une solution d'acide chlorhydrique à pH 1 et dialysés dans un tube de cellophane contre de l'eau distillée renouvelée. Quand cette dialyse est terminée, on ramène à pH 1 la suspension par adjonction d'acide chlorhydrique et on dialyse à nouveau. Cette opération est répétée quatre fois. Nous obtenons ainsi des *acides humiques affinés* (HCl).

Dans le cas de l'anmoor AM, nous avons également préparé des *acides humiques affinés* (HF) par le traitement suivant : les acides humiques bruts séparés comme plus haut sont mis en suspension dans de l'eau distillée ; cette suspension est dialysée contre une solution comportant pour 10 litres d'eau distillée, 10 ml d'acide chlorhydrique concentré ($d = 1,18$) et 5 ml d'acide fluorhydrique ($d = 1,14$). Le liquide en contact est renouvelé deux fois par jour, pendant cinq jours. La suspension d'acides humiques est ensuite dialysée contre de l'eau distillée.

Les *acides humiques affinés* sont séchés sous vide à 35°C.

Les *acides fulviques bruts* sont traités de la même manière que les acides humiques pour donner des *acides fulviques affinés*.

Ces traitements permettent de préparer des « acides » à faible teneur en résidu minéral (tabl. 1) qui comportent de 2 à 8 p. 100 de cendres. Pour les acides humiques, le taux de silice des cendres est de l'ordre de 50 p. 100, quelquefois inférieur ; ces cendres sont principalement constituées de minéraux argileux entraînés ainsi que d'oxydes de fer et de calcium. Les acides fulviques de la même série comportent à peu près le même taux de cendres (3 à 7 p. 100), mais celles-ci ne contiennent presque pas de silice (0,3 p. 100 au maximum) ; elles sont, par ailleurs, riches en fer, calcium et phosphate.

Comme le montre le traitement de l'anmoor AM, les teneurs en cendres des divers produits varient considérablement suivant les techniques d'affinage (tabl. 2).

Nous avons séparé les *acides humiques globaux affinés* (HCl) en deux fractions : *acides hymatomélaniques* solubles dans l'éthanol, *acides humiques proprement dits*, insolubles dans ce même alcool. L'extraction des acides hymatomélaniques par l'éthanol a été effectuée à chaud pendant 8 heures dans un appareil de Soxhlet ou par agitation pendant 48 heures à température ordinaire. Dans le cas de l'anmoor AM, nous avons aussi extrait les acides hymatomélaniques à chaud directement sur les acides humiques bruts. Leur teneur en cendres est alors beaucoup plus élevée.

L'ensemble des opérations effectuées est résumé dans le tableau 3.

## IV. — PYROLYSE DES SUBSTANCES HUMIQUES AFFINÉES

Dans les échantillons étudiés, les courbes d'A. T. D. présentent une grande homogénéité pour les acides humiques globaux affinés (HCl) quand les conditions de chauffage sont identiques. Au contraire, les courbes obtenues à partir des acides fulviques affinés (HCl) montrent plus de diversité. Elles sont d'autre part nettement plus complexes. Nous étudierons séparément les deux groupes.

### A. — *Acides humiques*

Les courbes d'A. T. D. (fig. 2) obtenues sous oxygène à partir d'acides humiques affinés (HCl) commencent toutes par présenter un crochet endothermique d'importance moyenne qui débute en même temps que le chauffage pour atteindre son maxi-

TABLEAU I

*Cendres des composés affinés* (HCl)

| | Acides fulviques | | Acides humiques | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | AH globaux affinés | | AH proprement dits | | Ac. hymato-mélaniques |
| | Taux de cendres p. 100 | Taux de $SiO_2$ p. 100 | Taux de cendres p. 100 | Taux de $SiO_2$ p. 100 | Taux de cendres p. 100 | Taux de $SiO_2$ p. 100 | Taux de cendres p. 100 |
| CO | 3,5 | 0,35 | 8,2 | 2,4 | | | 0,7 |
| LG | 2,6 | traces | — | — | | | |
| MA | 4 | traces | — | — | | | |
| AM | 3 | traces | 2,1 | 0,46 | 2,7 | 0,87 | traces |
| $MZ_1$ | 5,7 | 0,5 | 5,4 | 1,4 | | | |
| $MZ_2$ | 5,6 | — | | | 7 | 4 | |
| $MZ_3$ | 7 | — | 5 | 2,4 | 6 | 3 | 4,6 (à froid)<br>7,5 (à chaud) |

mum vers 70-80°C. Dès 220°C, commence toujours un accident exothermique généralement applati qui culmine vers 300-320°C. Enfin, se développe à partir de 350°C un pic exothermique très intense dont la pointe se situe entre 410 et 450°C suivant

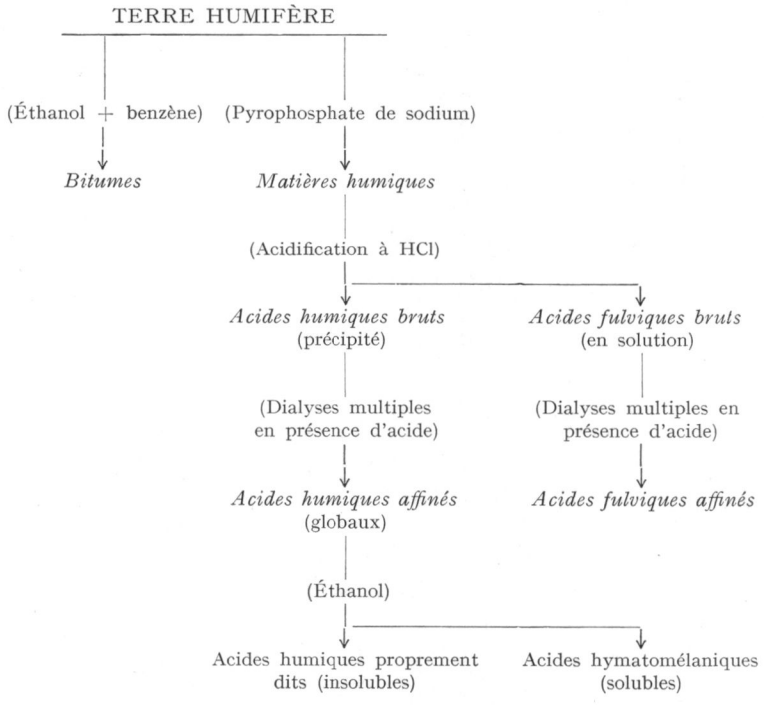
TABLEAU 2

*Teneur en cendres des matières humiques extraites de l'anmoor AM*

| | Acides fulviques | | Acides humiques globaux | |
|---|---|---|---|---|
| | Teneur en cendres p. 100 | Teneur en $SiO_2$ p. 100 | Teneur en cendres p. 100 | Teneur en $SiO_2$ p. 100 |
| Produits bruts . . . . . | 5,4 | traces | 6 | 2 |
| Produits affinés (HCl). | 3,3 | traces | 2,1 | 0,5 |
| Produits affinés (HF). . | 0,7 | traces | 1 | 0,5 |

TABLEAU 3

*Extraction des composés organiques du sol*




les échantillons. La courbe rejoint ensuite la ligne de base. Les courbes obtenues à partir des acides humiques proprement dits sont pratiquement identiques à celles des acides humiques globaux affinés.

Avec chauffage sous courant d'azote (fig. 3), nous avons observé après l'accident endothermique initial un seul gros crochet exothermique étalé et complexe (470-500°C).

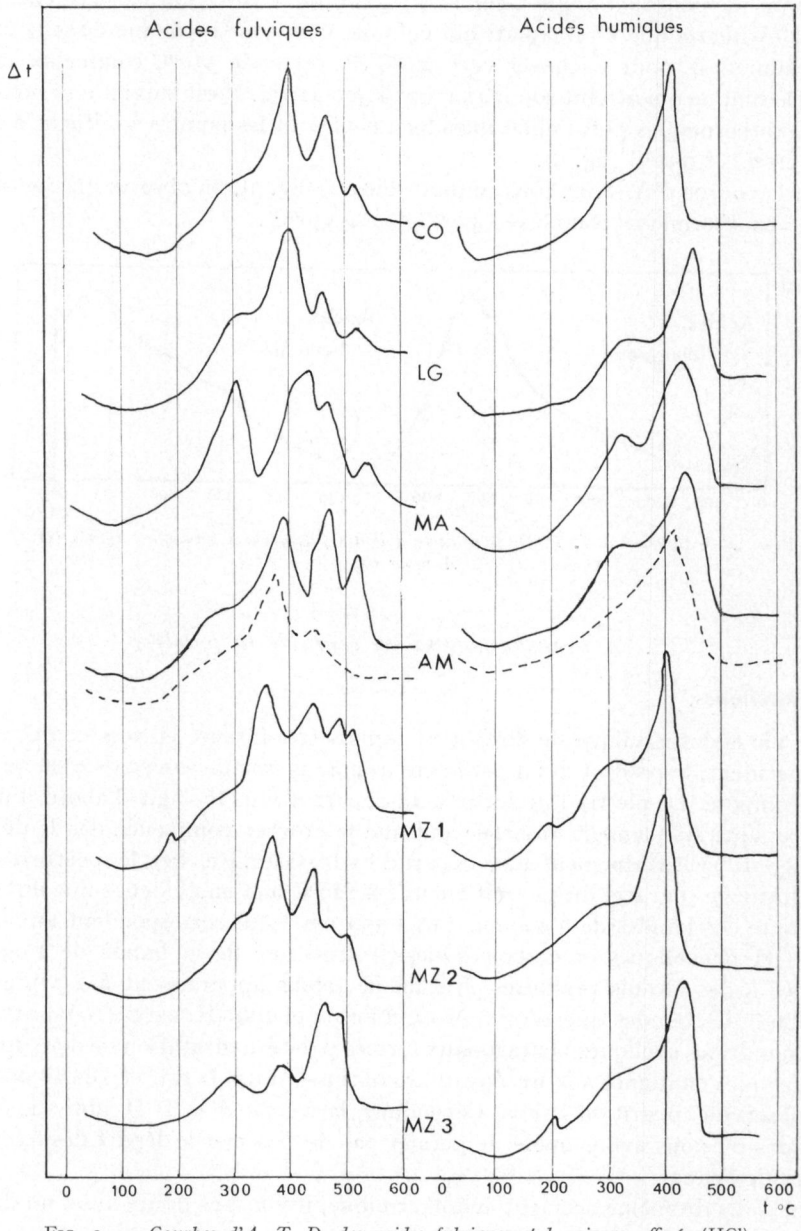



FIG. 2. — *Courbes d'A. T. D. des acides fulviques et humiques affinés* (HCl)
Trait plein : pyrolyse sous oxygène.
Trait interrompu : pyrolyse sous oxygène après un préchauffage à 550°C sous azote.

### B. — *Acides fulviques*

Lors du chauffage dans un courant d'oxygène, les courbes d'A. T. D. montrent d'abord un pic endothermique assez fort maximum à 70°C. On observe ensuite un accident exothermique assez aplati qui culmine vers 300°C (comme dans le cas des acides humiques), pour s'achever vers 320°C. A partir de 350°C commence un fort pic exothermique qui atteint son maximum à 390-410°C. Il est suivi d'une succession de pics exothermiques plus faibles mais bien nets dont les pointes se situent à 450°C, 490°C, 515°C et 550°C (fig. 2).

Sur la courbe d'A. T. D. sous courant d'azote (fig. 3), on observe encore un gros accident exothermique complexe (470°C-520°C-530°C).

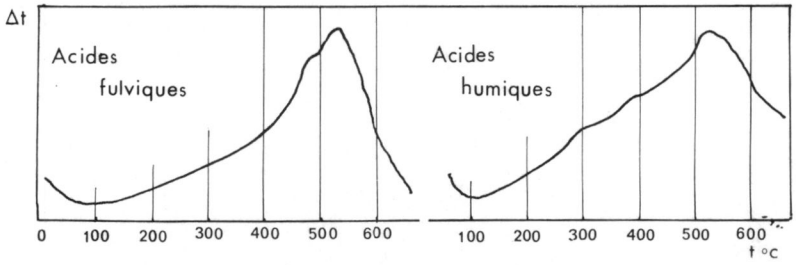



FIG. 3. — *Courbes d'A. T. D. sous azote d'acides fulviques et humiques affinés* (HCl) *Anmoor CO*

### C. — *Transformations au cours de la pyrolyse*

*Acides humiques.*

Le pic endothermique de 80°C n'est jamais très intense et vers 220°C, à la fin de cet accident, le produit qui a perdu environ 20 p. 100 de son poids n'est qu'encore peu décomposé. Le pic traduit surtout un départ d'eau. Il s'agit d'abord d'une eau hygroscopique simplement absorbée puisque le crochet commence dès le début du chauffage. Il y a certainement aussi départ d'hydroxyles. En effet, le spectre d'absorption infrarouge (fig. 4 *g*) du produit chauffé à 220°C met en évidence une diminution importante des bandes de 3 400 $cm^{-1}$ et 2 550 $cm^{-1}$ qui correspondent aux groupements OH phénoliques et carboxyliques (1) ainsi que de la bande de 1 030 $cm^{-1}$ attribuée à des alcools primaires. En même temps apparaissent à 1 775 $cm^{-1}$ et 1 840 $cm^{-1}$ des bandes que WOOD, MOSCHOPEDIS et DEN HERTOG (1961) attribuent à des anhydrides cycliques pentagonaux formés par déshydratation de deux fonctions carboxyliques contiguës sur un noyau aromatique, dont JUSTE et DELAS ont également observé l'apparition (1969). Cependant, la courbe d'A. T. D. obtenue dans les conditions où nous avons opéré ne permet pas de dissocier le départ des hydroxyles de celui de l'eau.

Au cours du même accident endothermique, il y a sans doute aussi un début de

(1) La bande attribuée aux groupements — COOH (1 720 $cm^{-1}$) des acides humiques est d'autant plus importante que des traitements acides successifs ont plus complètement affiné le produit et « libéré » un plus grand nombre de fonctions (Th. DUPUIS et P. JAMBU, 1969). Les « acides » humiques bruts des sols calciques ne présentent à cette fréquence qu'une bande très faible.

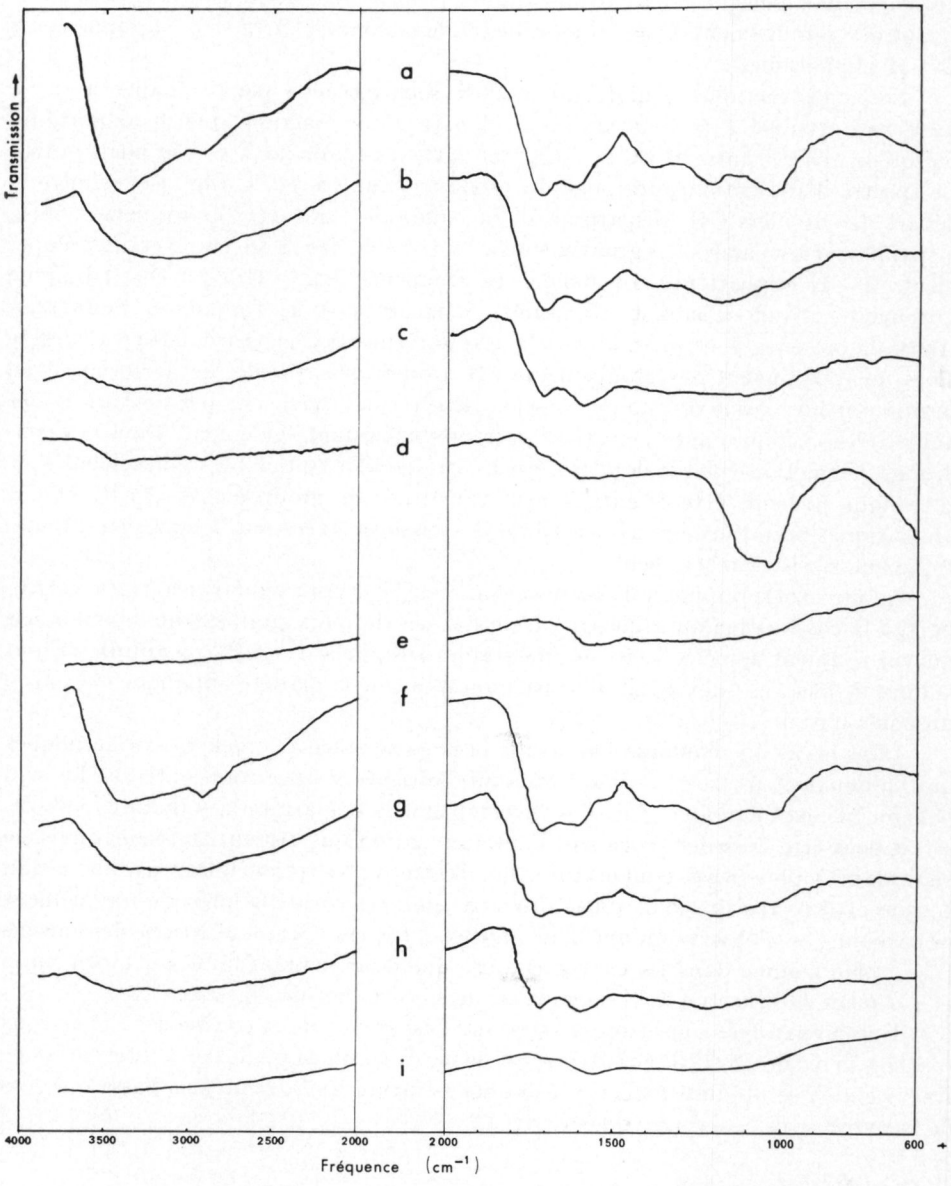



FIG. 4. — *Modification au cours de la pyrolyse du spectre d'absorption infrarouge des acides fulviques et humiques affinés* (HCl) *de l'anmoor d'Amuré* (AM)

Acides fulviques
- *a*) non chauffés
- *b*) chauffés à 220°C sous oxygène
- *c*) chauffés à 320°C sous oxygène
- *d*) chauffés à 410°C sous oxygène
- *e*) chauffés à 550°C sous azote

Acides humiques
- *f*) non chauffés
- *g*) chauffés à 220°C sous oxygène
- *h*) chauffés à 350°C sous oxygène
- *i*) chauffés à 550°C sous azote

décomposition puisque nous voyons diminuer faiblement l'intensité des bandes de 1 720 $cm^{-1}$ (groupements C = O des acides et des cétones) et 2 120 $cm^{-1}$ (groupements C — H aliphatiques).

Le pic exothermique qui débute à 220°C sous oxygène pour culminer à 320°C peut être attribué à l'oxydation et au départ d'une fraction volatile importante puisqu'on observe entre 220°C et 350°C une perte d'environ 30 p. 100 du poids initial. Le spectre d'absorption infrarouge du produit chauffé à 350°C (fig. 4 *h*) montre le départ des derniers OH (disparition de la bande de 3 400 $cm^{-1}$). En même temps, disparaissent les bandes des groupements C — O des acides (1 220 $cm^{-1}$) et des groupements C — H aliphatiques. La bande des groupements C = O (1 720 $cm^{-1}$) diminue fortement ; ce qui en subsiste traduirait, en accord avec les travaux de SCHNITZER (1965), la présence de cétones. La bande des groupements C = O aromatiques subsiste alors qu'apparaissent des groupements CH aromatiques (bande de 3 060 $cm^{-1}$) en position ortho (bande de 740 $cm^{-1}$) selon SCHNITZER (1965). Les petites bandes des anhydrides cycliques antérieurement apparues subsistent également. Dans ces conditions, la fraction volatile dont le départ correspond à l'ensemble de l'accident exothermique pourrait être essentiellement constituée de groupements COOH et CH aliphatiques primitivement associés dans des chaînes fixées sur le squelette aromatique qui subsiste presque seul.

Le pic exothermique qui commence après 350°C pour culminer à 440°C correspond à la combustion du squelette carboné et des derniers groupements fonctionnels qui lui restaient associés (cétones très stables). Au-delà de 500°C, la courbe rejoint la ligne de base, ce qui traduit la disparition totale de la matière organique (98 p. 100 du poids initial).

Dans le cas du chauffage sous azote, la non existence de crochets exothermiques qui culminaient à 320°C et 440°C traduit l'absence d'oxydation externe. Le seul phénomène exothermique global qui accompagne la disparition des produits volatils serait peut-être lié à des processus d'auto-oxydation que MITCHELL (1960) envisage cependant à plus basse température. Le spectre d'absorption infrarouge du résidu à 550°C (46 p. 100 du poids initial) montre qu'il est constitué presque uniquement de carbone : on n'observe qu'une bande forte à 1 560 $cm^{-1}$, caractéristique des liaisons C=C, bien connue dans les charbons ainsi que deux bandes faibles à 1 025 $cm^{-1}$ et 1 080 $cm^{-1}$, dues à de faibles quantités de silicates occlus (fig. 4 *i*).

Une prépyrolyse sous azote à 550°C fait disparaître de la courbe d'A. T. D. sous oxygène le pic de 320°C. Il ne subsiste que le pic de combustion de la fraction carbonée fixe ; celui-ci se produit d'ailleurs à une température légèrement plus basse que lors de la pyrolyse directe sous oxygène (fig. 2).

*Acides fulviques.*

Le pic endothermique initial de la pyrolyse sous oxygène présente les mêmes caractères que celui des acides humiques et s'interprète de la même manière. Il est cependant nettement plus important dès le départ : ce phénomène traduit notamment l'hygroscopicité plus grande des acides fulviques. La perte de poids observée à 220°C (31 p. 100 du poids initial) est plus élevée que dans le cas des acides humiques. Le spectre d'absorption infrarouge du résidu permet d'observer les mêmes modifications (fig. 4 *b*). On note cependant un départ plus important de fonctions alcools.

Le premier pic exothermique est également analogue à celui des acides humiques.

Il correspond cependant à une perte de poids plus importante (49 p. 100 du poids initial entre 220°C et 320°C). La modification du spectre d'absorption infrarouge (fig. 4 *c*) est très semblable à ce qu'on observe avec les acides humiques : la disparition de la bande de 2 920 $cm^{-1}$ traduit en particulier l'élimination des CH aliphatiques. Cependant, les chaînes aliphatiques et carboxyliques semblent quantitativement plus importantes. En outre, le résidu à 320°C apparaît riche en fer libéré sous forme d'oxyde à cette température.

A 350°C, commence l'oxydation du résidu « fixe » qui comporte plusieurs étapes (trois au quatre selon le cas) traduites chacune par un pic exothermique sur la courbe d'A. T. D. La première comporte à 410°C l'élimination d'environ 14 p. 100 du poids initial de substance. Elle laisse un résidu dont le spectre d'absorption infrarouge (fig. 4 *d*) montre qu'il est essentiellement constitué de phosphate (avec peut-être quelques traces de silicates) et d'une faible quantité de matière organique qui semble formée des mêmes groupements que dans le résidu à 320°C. Les autres étapes sont plus difficiles à suivre en raison de la très faible quantité de substance résiduelle. Nous verrons cependant que les autres pics paraissent liés à la présence d'éléments métalliques (fer et calcium notamment) dans des produits incomplètement affinés.

Dans le cas de la pyrolyse sous azote (fig. 3), les phénomènes sont identiques à ceux observés avec les acides humiques. Le résidu après chauffage à 550°C apparaît presque uniquement constitué de carbone : le spectre d'absorption infrarouge (fig. 4 *e*) ne montre qu'une bande à 1 560 $cm^{-1}$, due aux groupements C=C ainsi que des bandes faibles mais distinctes dans la région 700-900 $cm^{-1}$, caractéristiques de CH aromatiques. Il ne reste plus trace de la bande des groupements C=O. Ces résultats sont en accord avec les travaux de BROOKS, DURIE et STERNHELL (1958). Ajoutons que la perte de poids est plus importante avec les acides fulviques qu'avec les acides humiques (65 contre 54 p. 100).

La courbe d'A. T. D. sous oxygène du résidu « fixe » préchauffé sous azote jusqu'à 550°C puis refroidi (fig. 2) montre la disparition totale du pic de 320°C. La combustion de la fraction fixe s'opère à une température un peu plus basse.

## V. — INFLUENCE DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX SUR LA PYROLYSE DES MATIÈRES HUMIQUES

### A. — *Influence de l'affinage sur la courbe d'A. T. D.*

Nous avons étudié les modifications apportées par un affinage de plus en plus poussé sur les composés fulviques et humiques de l'anmoor AM (fig. 5).

La courbe d'A. T. D. des *acides fulviques « bruts »* (fig. 5 *f*) montre, après l'accident endothermique initial, une succession de pics exothermiques qui débutent vers 200°C (maximum dédoublé à 295°C et 350°C), 390°C (maximum 410°C), 470°C (maximum 510°C) et 560°C (maximum 570°C). Pour les *acides humiques « bruts »* (fig. 5 *c*), le début de la courbe est assez identique avec un pic exothermique double qui débute vers 210°C pour culminer à 290°C et 365°C ; celui-ci est suivi d'un petit pic exothermique à 430°C (maximum 450°C) et d'un autre accident exothermique minuscule à 495°C (maximum 510°C). L'importance relative des pics semble montrer que les

phénomènes essentiels de décomposition des matières organiques se situent avant 400°C.

Nous avons déjà vu les courbes d'A. T. D. (fig. 5 *b* et *c*) obtenues avec les *produits affinés* (*HCl*). Elles apparaissent plus simples et les pics sont sensiblement modi-

FIG. 5. — *Influence de l'affinage sur la courbe d'A. T. D. des composés fulviques et humiques* (AM)

Acides humiques
*a*) affinés (HF)
*b*) affinés (HCl)
*c*) bruts

Acides fulviques
*d*) affinés (HF)
*e*) affinés (HCl)
*f*) bruts

Acides humiques
*g*) extraits à pH 7
*h*) extraits à pH 10

N. B. Par suite d'un décalage d'origine, les températures relatives à la courbe *f* sont sous estimées d'une vingtaine de degrés.

fiés. Les phénomènes exothermiques qui se produisent au-dessus de 400°C semblent présenter une plus grande importance relative.

Les courbes d'A. T. D. des *acides fulviques et humiques affinés* (*HF*) présentent une remarquable simplicité et une grande similitude entre elles (fig. 5 *a* et *d*). On observe dans les deux cas un pic exothermique très fort (début 360°C, maximum 430°C) qui correspond à la combustion de la fraction « fixe ». Il est important de noter la disparition sur la courbe des acides fulviques affinés (HF) du pic exothermique qui culminait à 390°C-410°C dans les acides fulviques bruts ou seulement affinés (HCl).

En rapprochant les données de la figure 5 et celles du tableau 2, on voit les courbes d'A. T. D. se modifier dans le sens de la complexité à mesure que croît la teneur du produit en cendres minérales. On peut penser que ces modifications sont dues soit à une décomposition partielle des composés organiques au cours de l'affinage, soit à la combinaison d'éléments minéraux avec les matières humiques.

On remarque que les acides humiques sont plus ou moins souillés de minéraux argileux floculés ou maintenus floculés par les traitements acides. Leur présence ne semble cependant pas influer sur la courbe d'A. T. D. quand leur taux est faible (moins de 5 p. 100 du produit humique). Les acides fulviques donnent des cendres surtout riches en fer, calcium et phosphate, ce dernier provenant de la solution d'extraction.

### B. — *Introduction d'éléments minéraux dans des produits affinés*

Nous ne donnerons ici que les premiers résultats d'une étude en cours dans laquelle nous associons des éléments minéraux à des produits organiques préalablement affinés (anmoor AM) et examinons les modifications introduites dans la courbe d'A. T. D. (fig. 6).

*Action du calcium.*

Les produits affinés (HF) ont été mis en contact avec une solution de chlorure de calcium en milieu acide, puis séchés à 50°C. La quantité d'ions calcium introduite a été calculée de manière à saturer approximativement la capacité d'échange des composés organiques.

Dans le cas des acides humiques, on observe après calcification un double pic intense exothermique (max. 315 et 390°C), puis, à partir de 420°C, un grand accident exothermique présentant un épaulement vers 450°C et culminant à 520°C. La courbe (fig. 6 *g*) est pratiquement identique à celle (fig. 5 *h*) des acides humiques bruts extraits à pH 10 dans la seconde phase de la technique proposée par Duchaufour et Jacquin (1963) après précipitation à l'acide chlorhydrique et neutralisation à la soude. Rappelons que les auteurs extraient ainsi une fraction organique où dominent les acides humiques « gris » calciques et immobiles.

Dans ces conditions, on peut être à peu près certain que les modifications apportées par l'affinage à la courbe d'A. T. D. ne proviennent pas d'une décomposition partielle de la matière organique. Tout se passe comme si la fixation d'ions Ca à la place d'ions H augmentait la stabilité thermique d'un certain nombre de fonctions et retardait leur pyrolyse. Juste et Delas (1969) sont arrivés à une conclusion identique par spectrographie d'absorption infrarouge.

Dans le cas des acides fulviques (fig. 6 *b*), on observe un premier pic exothermique qui culmine vers 465°C (avec un épaulement à 300°C), suivi d'un second dont

le maximum se situe vers 545°C. Dans l'ensemble, la fixation de calcium semble encore conférer au produit une plus grande stabilité thermique.

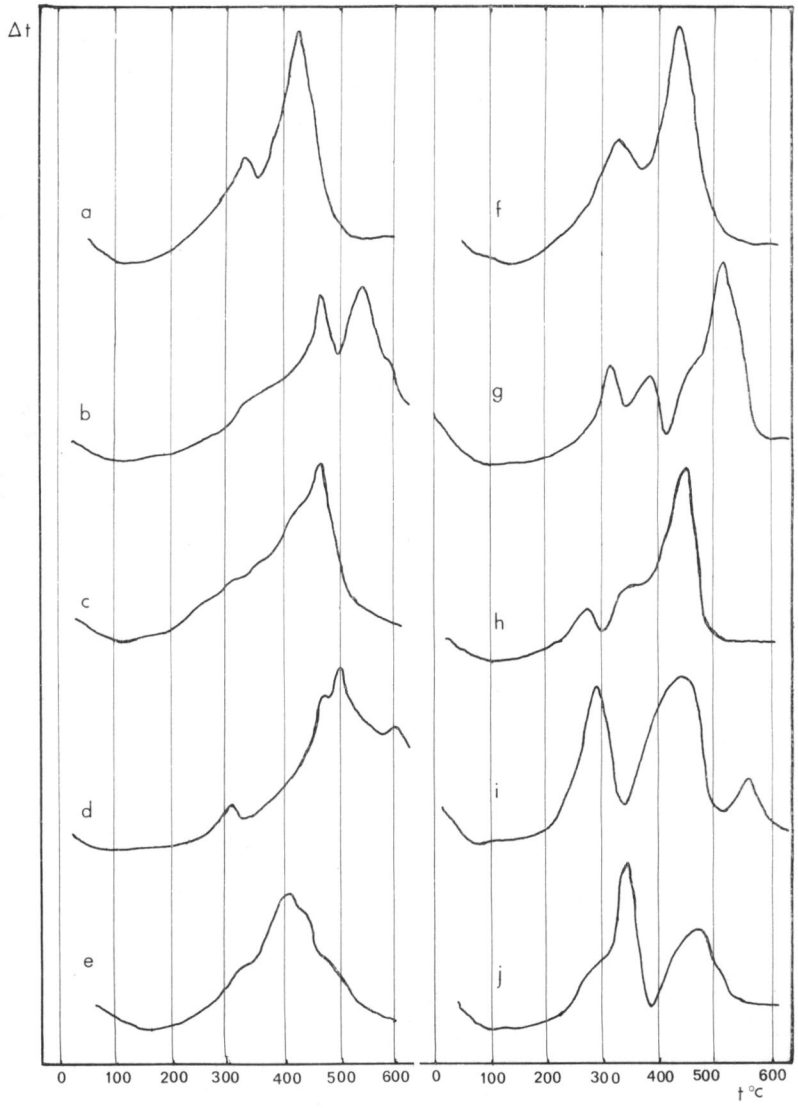



FIG. 6. — *Modification de la courbe d'A. T. D. des composés fulviques et humiques affinés, sous l'influence des éléments minéraux*

Acides fulviques :
- *a*) affinés (HF)
- *b*) traités Ca
- *c*) traités Fe
- *d*) traités phosphate et Ca
- *e*) traités phosphate et Fe

Acides humiques :
- *f*) affinés (HF)
- *g*) traités Ca
- *h*) traités Fe
- *i*) + argile (fraction dispersée)
- *j*) + argile (floculat)

Le magnésium présente un comportement voisin de celui du calcium.

*Action du fer.*

Les produits affinés (HF) ont été mis en contact pour fixation avec une solution de chlorure ferrique à pH 1, puis séchés à 50°C. Ici encore, la quantité d'ions ferriques introduite a été calculée de manière à saturer approximativement la capacité d'échange des produits organiques.

Dans le cas des acides humiques (fig. 6 *h*), le pic exothermique à 320°C des produits affinés (HF) est remplacé par un pic, également exothermique, à 260°C et un épaulement important vers 360°C. Par ailleurs, le pic exothermique qui culminait vers 430°C est reporté à 450°C. Ces modifications multiples de la courbe d'A. T. D. donnent à penser que la fixation du fer sur les matières humiques pourrait être un phénomène complexe relevant simultanément de plusieurs mécanismes.

Dans le cas des acides fulviques (fig. 6 *c*), on observe un grand accident exothermique d'ensemble qui culmine à 470°C. Sa branche ascendante complexe comporte une série d'épaulements qui débutent vers 200°C (max. 250°C), 270°C (max. 290°C), 345°C (max. 380°C) et 405°C (max. 430°C). Nous n'avons pas observé comme SCHNITZER et SKINNER (1964) un abaissement important de la température de la phase principale de pyrolyse des acides fulviques sous l'action du fer.

*Action des phosphates.*

Nous avons essayé de fixer des ions phosphoriques sur les produits affinés (HF) par mise en contact à différents pH. Nous n'avons obtenu de modification de la courbe d'A. T. D. (fig. 6 *d* et *e*) et par conséquent de fixation probable qu'en ajoutant également des ions métalliques polyvalents (calcium ou fer). LEVESQUE et SCHNITZER (1967) étaient arrivés à la même conclusion par des études de thermogravimétrie dérivée.

Les premiers résultats d'essais effectués sur les seuls acides fulviques semblent permettre deux constatations. En présence d'ions phosphoriques, le pic exothermique culminant à 545°C dans les cas des fulvates calciques est abaissé vers 505°C. Par ailleurs, après contact des acides fulviques avec des ions phosphoriques et ferriques, il apparaît sur la courbe d'A. T. D. un pic exothermique intense qui culmine vers 400°C.

*Action des argiles.*

Nous avons agité pendant 8 heures une solution d'acides humiques affinés (HF) ajustée à pH 6 par la potasse avec une argile d'origine pédologique (smectite dominante), saturée de potassium et d'ammonium. Nous avons séparé par centrifugation un culot argileux, qui a retenu un peu d'acide humique, d'une phase liquide surnageante de teinte brune où se trouve la majeure partie des acides humiques.

Cette phase liquide a été filtrée, puis séchée à 50°C. Le résidu humique contenait alors 18,5 p. 100 de cendres (contre 1 p. 100 dans le produit affiné) par suite de la rétention d'une faible part de la fraction minérale introduite. La courbe d'A. T. D. (fig. 6 *i*) présente deux pics exothermiques très intenses (max. vers 290°C et 445°C) suivis d'un autre, plus faible, vers 560°C. Les deux premiers pics exothermiques se produisent sensiblement à la même température que pour l'acide humique affiné, mais le premier est beaucoup plus intense. Or, dans le cas de l'acide humique affiné (HF), l'importance de la perte de poids correspondant à ce crochet (de l'ordre de 70 p. 100) ne semble pas traduite fidèlement par l'aire de l'accident en raison de phé-

nomènes de distillation brutale que la méthode de dilution dans l'alumine calcinée permet d'atténuer. On peut supposer qu'ici, les liaisons argile-acide humique rendent la distillation moins brutale et, par conséquent, plus visible l'oxydation de la fraction volatile, en dépit de l'énergie que peut requérir la rupture de ces liaisons. Les faits rapportés sont reproductibles : nous avons observé le même phénomène avec d'autres minéraux argileux ainsi qu'avec du silicate de potassium. Il se produit aussi, mais à température un peu plus élevée, avec le culot de centrifugation où l'argile a fixé un peu d'acide humique (fig. 6 *j*).

La courbe d'A. T. D. obtenue avec les acides humiques bruts dispersés à pH 7 lors de la première extraction de la technique de fractionnement de DUCHAUFOUR et JACQUIN (1963) qui libère surtout des acides humiques mobiles « bruns » est très identique (fig. 5 *g*).

Les acides fulviques affinés (HF) mis au contact de minéraux argileux présentent aussi sur la courbe d'A. T. D. un net accroissement du pic exothermique maximum à 300°C. Il en va de même avec les acides fulviques bruts neutralisés à la soude.

### C. — *Conclusion*

Nous avons vu (fig. 2) les courbes d'A. T. D. obtenues avec les acides fulviques et humiques affinés (HCl) extraits de différentes stations.

Il convient de souligner que cet affinage incomplet laisse subsister encore beaucoup d'éléments minéraux associés aux produits organiques « acides ». Les quantités d'éléments minéraux sont variables dans les diverses stations et peuvent contribuer à expliquer les différences observées d'une courbe à l'autre.

Ainsi, par exemple, dans le cas des acides fulviques, le pic exothermique à température élevée qui paraît lié à l'abondance du calcium (max. 505°C-520°C en présence de phosphate et 550°C en l'absence de phosphate) est manifeste dans tous les anmoors calciques, mais très réduit dans les tourbes. Le pic exothermique de 450°C-470°C, dont l'importance paraît conditionnée par la présence de fer, existe dans toute la séquence, mais sa température exacte est probablement liée à l'état du fer. Le pic exothermique de 390°-410°C, dont le phosphate semble responsable, est absent dans l'échantillon MA. Le pic exothermique de 300°C enfin, qui semble traduire une liaison argile-humus, n'apparaît que dans les acides humiques bruts ; on peut le confondre avec un pic exothermique des bitumes présents dans l'acide fulvique MA alors qu'il n'y a pas d'argile.

A la lumière de cette étude préliminaire, on peut penser que des recherches plus poussées permettraient de caractériser les humus des différentes stations par la courbe d'A. T. D. des produits fulviques et humiques *bruts* extraits à différents pH *après élimination des bitumes*.

## VI. — COMPARAISON DE L'ACTION DE L'EAU OXYGÉNÉE ET DE LA PYROLYSE DES COMPOSÉS HUMIQUES

Il est intéressant de comparer l'action de l'oxydation par chauffage sous oxygène avec l'action progressive de destruction des acides humiques et fulviques par l'eau oxygénée.

Des attaques de plus en plus poussées par l'eau oxygénée ont été effectuées sur des produits affinés (HCl) et suivies de l'établissement de la courbe d'A. T. D. des composés résiduels.

Avec les acides humiques, le pic exothermique de 435°C disparaît progressivement alors que subsiste encore celui de 320°C. Ceci semble traduire l'ouverture des cycles aromatiques avec formation d'acides aliphatiques plus ou moins salifiés, selon l'abondance des métaux présents.

Dans le cas des acides fulviques, le même phénomène global se produit. Cependant, dans un premier temps, le pic exothermique de 390°C, qui semble traduire une liaison avec des ions phosphoriques, disparaît. Le pic exothermique de 465°C s'évanouit ensuite, alors que le pic de 300°C subsiste encore après une longue attaque.

On peut souligner la différence fondamentale qui se manifeste entre l'oxydation précédée de distillation au cours de la pyrolyse et l'oxydation en milieu liquide par l'eau oxygénée. Cette dernière libère des acides aliphatiques particulièrement aptes à former avec le fer des complexes relativement stables observés depuis longtemps par DUCHAUFOUR (1953).

## VII. — PYROLYSE DES ACIDES HYMATOMÉLANIQUES

Les acides hymatomélaniques solubilisés par l'éthanol à chaud ou à température ordinaire fournissent, après dessiccation, des courbes d'A. T. D. sous courant d'oxygène extrêmement semblables (fig. 7 *a* et *b* — *c* et *d* — *f* et *g*). Ces courbes diffèrent par ailleurs très peu de celles obtenues à partir des acides humiques affinés (HCl) qui sont absolument identiques à celles données par les acides humiques proprement dits.

Avec les acides hymatomélaniques, on observe cependant une accentuation du pic exothermique qui culmine vers 320°C. La position du pic exothermique intense qui présente son maximum vers 440°C et qui correspond surtout à la combustion de la fraction « fixe » n'est pas modifiée, mais on observe ensuite quelques pics exothermiques plus faibles vers 490°C et 520°C.

Les acides hymatomélaniques ainsi préparés par l'éthanol sont en réalité des esters éthyliques. Leur saponification par la soude permet d'éliminer les groupements $C_2H_5$ fixés. Après traitement à l'acide chlorhydrique et dialyse, ces produits donnent une courbe d'A. T. D. (fig. 7 *h*) semblable à celle des acides humiques affinés (HCl) : le pic exothermique de 330°C est d'intensité comparable, mais il subsiste à 495°C un pic exothermique moyen qui n'apparaissait pas avec l'acide humique affiné (HCl).

Ces acides hymatomélaniques semblent retenir moins de minéraux argileux que les acides humiques proprement dits. Ils contiennent cependant une quantité relativement importante de métaux et en particulier de fer.

La considération de leur courbe d'A. T. D. conduit à les rapprocher des acides fulviques, notamment en ce qui concerne les pics exothermiques qui paraissent conditionnés par la présence de métaux. En particulier, le pic de 520°C, qui n'apparaît que dans l'extrait à l'éthanol préparé à chaud, pourrait être dû à la présence d'un composé calcique peu soluble à froid.

Il est aussi possible d'extraire des acides hymatomélaniques bruts. Les courbes d'A. T. D. (fig. 7 *e*) sont alors très comparables à celles des acides humiques bruts.

De toute manière, les acides hymatomélaniques apparaissent comme des composés intermédiaires entre les acides fulviques et les acides humiques.

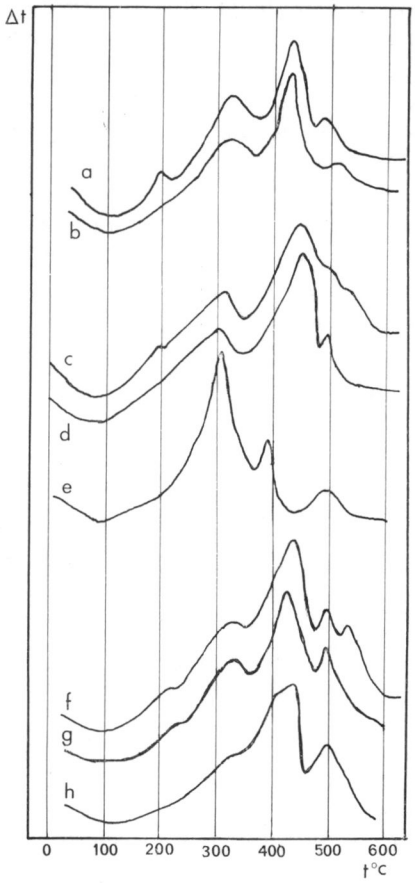



FIG. 7. — *Courbes d'A. T. D. des acides hymatomélaniques*

Affinés et extraits à chaud *a*) (CO) *c*) (AM) *f*) ($MZ_3$)
Affinés et extraits à froid *b*) (CO) *d*) (AM) *g*) ($MZ_3$)
Bruts et extraits à chaud *e*) (AM)
Affinés, extraits à chaud et saponifiés *h*) ($MZ_3$)

## VIII. — CONCLUSION

L'analyse thermique différentielle des matières humiques apporte manifestement des indications précieuses quant à la constitution de celles-ci. Il semble notamment qu'elle autorise la mise en évidence de l'existence de composés organo-métalliques (sels ou complexes) dont l'étude est ébauchée. On peut espérer, par ailleurs, que cette technique permettra de caractériser les humus formés dans des conditions écologiques différentes.

*Reçu pour publication en janvier 1970.*

## SUMMARY

### INVESTIGATION OF ORGANIC SUBSTANCES EXTRACTED FROM HYDROMORPHOUS CALCIC SOILS BY DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS

The authors studied the behaviour of various humic compounds (bitumen, fulvic acids, hymatomelanic acids, crude or refined humic acids extracted from Ca-containing, peats and anmoors) under the action of heat, with the aid of differential thermal analysis, in an inert oxidizing atmosphere.

The stages of pyrolysis shown by the D.T.A. curves are defined by means of infra-red absorption spectrography.

The methods of extraction and refining used are expressed by modifications in the D.T.A. curve. In particular, there is a direct relationship between the refining (shown by the ash content) and the thermal stability of the substances.

A certain number of organomineral complexes may be differentiated when comparing the D. T. A. curves of impure or refined humic and fulvic acids with those of very pure products with which are various mineral constituents associated (calcium, iron, phosphate and clay). These products exist in varying proportions in humic compounds extracted from different points of a drainage system. It therefore appears that the D.T.A. curve may enable the types of humus formed in various ecological conditions to be differentiated.

## ZUSAMMENFASSUNG

### UNTERSUCHUNG MITTELS DER THERMISCHEN DIFFERENTIAL-ANALYSE DER AUS KALKIGEN, HYDROMORPHEN BÖDEN EXTRAHIERTEN ORGANISCHEN STOFFE.

Unter Einwirkung von Hitze und mit Hilfe der in inerter und oxydierender Atmosphäre durchgeführten thermischen Differentialanalyse untersuchen die Verfasser das Verhalten der verschiedenen humushaltigen Verbindungen (aus Torf und kalkigen Anmooren extrahierte Bitumen, Fulvosäuren, Hymatomelansäuren, rohe oder raffinierte Huminsäuren).

Die durch die A. T. D.-Kurven nachgewiesenen Pyrolysestufen werden mittels der Infrarot-Absorptionsspektrographie präzisiert.

Die verwendeten Extraktions- und Raffinierverfahren äussern sich durch Modifikationen der A. T. D.-Kurve. Besonders besteht eine enge Beziehung zwischen der Raffinierung (ausgedrückt durch den Aschengehalt) und der thermischen Stabilität der Substanzen.

Der Vergleich zwischen den A. T. D.-Kurven roher oder raffinierter Humin- und Fulvosäuren mit denjenigen sehr reiner Produkte, zu denen man verschiedene mineralische Grundstoffe (Calcium, Eisen, Phosphat, Ton) zählt, erlaubt eine gewisse Anzahl organomineralischer Komplexe zu charakterisieren.

### *Изучение с помощью дифференциального теплового анализа, органических веществ экстрагированных из гидроморфных известковых почв.*

Тереза ДЮПЮИ, П. ЖАМБЮ, Ж. ДЮПЮИ.

## РЕЗЮМЕ

С помощью дифференциального теплового анализа в инертной или окисляющей атмосферах, авторы изучали поведение некоторых гуминовых соединений (асфальты, фульвокислоты, гиматомелановые кислоты

и необработанные или очищенные гуминовые кислоты торфов и известковых болотистых торфяников) на которые было оказано тепловое воздействие.

Различные этапы пиролиза были определены при помощи кривых ДТА и уточнены спектрографией инфра-красного поглощения.

Примененные способы экстрагирования и очищения выражаются в различиях кривой ДТА Существует, в частности, тесное соотношение между очищением (выраженным содержанием пепла) и термической стабильностью гуминовых веществ.

Сравнивая кривые ДТА необработанных или очищенных гуминовых и фульво-кислот с кривыми чистых продуктов поставленных в сообщество с разными минеральными компонентами (кальций, железо, фосфат, глина), авторам удалось охарактеризовать некоторые органо-минеральные комплексы, существующие в разных пропорциях в гуминовых соединениях экстрагированных в разные моменты эпизодов осушения. Таким образом, является значит возможность, охарактеризовать с помощью кривых ДТА гумусы сформировавшиеся в различных экологических условиях.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


Brooks J. D., Durie R. A., Sternhell S., 1958. Chemistry of brown coals. III. Pyrolytic reactions, *Austral. J. Appl. Sci.*, **2**, 303-320.

Duchaufour Ph., 1953. Note sur la solubilité du fer par la matière organique dans certains sols. *Bull. A F. E. S.*, **46**, 7-13.

Duchaufour Ph., Jacquin F., 1963. Recherche d'une méthode d'extraction et de fractionnement des composés humiques contrôlée par l'électrophorèse. *Ann. agron.*, **14** (6), 885-918.

Dupuis Th., Jambu P., 1969. Étude par spectrographie infrarouge des produits de l'humification en milieu hydromorphe calcique. *Sci. Sol*, **1**, 23-35.

Jambu P., 1968. Observations sur l'humification en milieu calcique hydromorphe. Cas des sols du Marais Poitevin (Marais Mouillé). *Sci. Sol*, **1**, 67-89.

Juste C., Delas J., 1969. Influence du degré de salification d'un composé humique sur son comportement thermique. *Ann. agron.*, **20** (2), 145-159.

Levesque M., Schnitzer M., 1967. Organo-metallic interactions in soils : VI. Preparation and properties of fulvic acid-metal phosphates. *Soil Sci.*, **103**, **3**, 183-190.

Mitchell B. D., 1960. The differential thermal analysis of humic substances and related materials. *Sci. Proc. Roy. Dublin Soc.*, Sér. A. **1** (4), 105-114.

Paulik F., Weltner M., 1958. Über die derivative thermogravimetrische Analyse von Torfen und Torfbestandteilen. *Acta Chim. Acad. Sci. Hung.*, **16**, 159-184.

Scharpenseel H. W., König E., Menthe E., 1964. Infrarot- und Differential-Thermo-Analyse an Huminsäureproben aus verschiedenen Bodentypen aus Wurmkot und Streptomyceten. *Zeitsch. Pflanz. Düng. Bodenk.*, **106** (2), 134-150.

Schnitzer M., 1965. The application of infrared spectroscopy to investigations on soil humic compounds. *Canad. Spectroscopy*, **10** (5), 121-127.

Schnitzer M., Skinner S. I. M., 1964. Organo-metallic interactions in soils : 3. Properties of iron- and aluminium-organic-matter complexes prepared in the laboratory and extracted from a soil. *Soil Sci.*, **98** (3), 197-203.

Wood J. C., Moschopedis J. E., Den Hertog W., 1961. Studies in humic acid chemistry. II. Humic acid anhydrides. *Fuel*, **40**, 491-502.

*Ann. agron.* 1970, **21** (1), 95-108.

# ÉTUDE DE LA SÉPARATION, A L'AIDE DES CITRATES, DES ORTHOPHOSPHATES CALCIQUES CONTENUS DANS LES ENGRAIS

Y. BARDIN

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches d'Alsace, 68 - Colmar*
*Institut national de la Recherche agronomique*

RÉSUMÉ

L'analyse des orthophosphates calciques dans les engrais à l'aide de solutions de citrate d'ammonium montre que les résultats dépendent en partie des caractéristiques de la solution employée.

Cette étude, tout en soulignant que cette solubilisation n'a de valeur que dans le cas des orthophosphates calciques, permet d'expliquer les causes de ces divergences. Elle essaie de déterminer les paramètres de la solution permettant la meilleure séparation du phosphate bicalcique des formes apatitiques et montre qu'il est intéressant d'utiliser une solution ayant un pH élevé voisin de 10,6 ce qui est le cas du citrate de Joulie.

## I. — INTRODUCTION

La mise en évidence d'importants effets fertilisants dus à d'autres formes de $P_2O_5$ que celle du phosphate monocalcique dans les superphosphates entraînèrent Joulie ainsi que d'autres chercheurs de l'époque à rechercher une séparation entre les phosphates dits « assimilables » et les phosphates apatitiques ; ils eurent recours à des solutions de citrate d'ammonium.

Cependant, chaque pays adopta, pour des raisons pratiques, des solutions différentes, et actuellement, trois citrates sont encore couramment utilisés dans différents pays :

— le citrate neutre américain :

acide citrique : 185 g/l ($c$ [1] = 0,88 mole/l) neutralisé avec de l'ammoniaque à pH = 7.

— le citrate de Petermann de pH = 9,6 :

acide citrique : 173 g/l ($c$ [1] = 0,825) contenant 42 g d'azote par litre.

— le citrate de Joulie de pH = 10,6 :

acide citrique : 400 g/l ($c$ [1] = 1,91) dissous dans l'ammoniaque concentrée ($d$ = 0,925), soit 55 g de $NH_3$ libre par litre.

Ces solutions conventionnelles donnent des résultats différents et plus ou moins reproductibles. Il est donc intéressant soit de choisir une des solutions ci-dessus, soit d'en trouver une autre correspondant le mieux aux problèmes posés actuellement :

— meilleure séparation possible entre le phosphate bicalcique et les formes apatitiques, c'est-à-dire solubilité maximale du phosphate bicalcique et insolubilité des formes apatitiques ;

— meilleure reproductibilité.

PEIRS (1969) a montré, ce qui corrobore nos propres recherches, que la solubilité des orthophosphates dans les citrates est due à la complexation des cations et non à des réactions de double décomposition. On ne peut donc pas comparer la solubilité d'orthophosphates dont les cations sont différents. C'est pourquoi le phosphore du Phospal soluble dans le citrate de Joulie a, *à priori*, une valeur différente de celui du phosphate bicalcique.

Cette étude fournit des renseignements intéressants sur la stabilité du complexe citrique en fonction du pH, mais le simple calcul des quantités théoriques de citrates nécessaires à pH 10 pour la dissolution de $10^{-2}$ moles de ces composés ne fait pas intervenir les problèmes techniques et en particulier cinétiques si bien que les résultats sont difficilement interprétables et utilisables du point de vue pratique.

D'autre part, la meilleure reproductibilité des résultats obtenue avec le citrate de Joulie ne nous paraît pas liée au fait que le phosphate solubilisé soit en majeure partie sous forme d'ions $HPO_4^{2-}$. Cet argument jouerait plutôt en faveur du citrate de Petermann (pH = 9,6) que du citrate de Joulie (pH = 10,6).

De plus, si la reproductibilité des méthodes a des conséquences pratiques importantes, elle n'est qu'un des éléments du choix d'un citrate. Il nous a donc paru utile de déterminer les paramètres de la solution de citrate d'ammonium permettant la meilleure séparation et la meilleure reproductibilité.

Pour cela, il est nécessaire de préciser :

— les conditions expérimentales qui, du point de vue pratique, permettent de limiter notre domaine de recherche ;

— la solubilité des phosphates bicalciques et apatitiques dans les solutions de citrates d'ammonium correspondant aux conditions ci-dessus.

(1) $c$ : concentration en ions citriques (ions grammes par litre).

## II. — ÉTUDE DE LA SÉPARATION DES ORTHOPHOSPHATES CALCIQUES DANS LES CITRATES

### 2. 1. *Conditions expérimentales*

Un certain nombre de conditions sont nécessaires pour que la séparation par les « citrates » s'effectue correctement :

— une prise homogène d'engrais (quantité minimum de 1 g),

— l'obtention d'un équilibre au bout d'un temps limité (24 heures).

Le phosphate bicalcique se dissout lentement. Il y a intérêt à augmenter la vitesse de réaction en partant d'une solution aussi concentrée que possible en ions citriques ; mais celle-ci est cependant limitée par la solubilité des formes apatitiques.

Nous sommes amenés à choisir :

— une concentration en ions citriques variant de 0,7 à 2 M,

— un volume de 100 ml de manière à pouvoir dissoudre 1 g de phosphate bicalcique (soit $0{,}73 \cdot 10^{-2}$ moles),

— un pH > 7 ; celui-ci est également limité supérieurement à 11 du fait que l'ammoniaque est une base faible.

Finalement, le schéma expérimental retenu consiste :

— à solubiliser 1 g d'engrais dans 100 ml d'une solution de citrate d'ammonium de concentration variant de 0,7 à 2 M et de pH compris entre 7 et 11,

— à doser le phosphore solubilisé en admettant que celui-ci corresponde à la dissolution des phosphates-mono et bicalciques (on néglige ainsi la solubilité des formes apatitiques).

### 2. 2. *Étude de la solubilité des orthophosphates calciques dans les solutions de citrate d'ammonium répondant aux conditions ci-dessus*

Dans des solutions de forte concentration, l'activité d'un ion n'est pas égale à sa concentration, mais on a :

$$A\,(I) = fi\,[I]$$

$A\,(I)$ : activité de l'ion I — $fi$ : facteur d'activité de I — $[I]$ : concentration de l'ion I

D'autre part, nous admettons que les solutions sont suffisamment tamponnées du fait de leur concentration et que le pH ne varie pas par l'addition et la solubilisation d'un gramme d'engrais dans 100 ml (ce fait est entièrement vérifié pour des pH supérieurs à 8, mais n'est pas toujours certain à pH 7).

#### 2. 21. *Étude préliminaire.*

Dans un premier temps, nous démontrons que lors de la solubilisation d'orthophosphates de calcium dans des solutions de citrate d'ammonium de pH compris entre 7 et 11 et de concentration supérieure à 0,7 M, on peut écrire les équations :

$$[Ca]_T\ (1) = [Ca^{++}] + [CaCi^-]$$

et

$$[Ci]_T = [Ci^{3-}] + [CaCi^-]$$

Cela signifie que les composés $CiH^{2-}$, $CaHCi$ et $CaH_2Ci^+$ n'existent pas dans ces solutions.

(1) $[\ ]_T$ : quantité totale de l'atome ou du groupement d'atomes considéré en solution sous forme complexée ou non.

En traçant point par point les courbes de neutralisation de 18,5 g d'acide citrique dans 70 ml d'eau permutée en présence d'une quantité croissante d'ions $Ca^{++}$ jusqu'au rapport

$$\frac{Ca^{++}}{c} = 1$$

par une solution d'ammoniaque concentrée ($d = 0{,}925$), on obtient les points d'inflexions des différentes courbes pour un pH très proche de 7 après avoir ajouté une quantité d'ammoniaque égale à celle qui est nécessaire à la neutralisation des trois acidités de l'acide citrique. Par conséquent, les formes $CiH^{2-}$, $CaH_2Ci^+$ et $CaHCi$ ont été entièrement neutralisées pour des pH $> 7{,}2$ et les équations précédentes peuvent être considérées comme exactes, même à pH 7.

Cependant, pour les citrates dont le pH est de 7, le milieu n'étant pas suffisamment tamponné, il peut se former de petites quantités de $CaHCi$ et $CiH^-$, ce qui peut être la cause d'une mauvaise reproductibilité (Peirs *et al.*, 1969).

Dans le cas des formes apatitiques, la quantité de calcium solubilisé est très faible, et on peut négliger la concentration des ions $CaCi^-$ devant celle des ions $Ci^{3-}$ et écrire

$$[Ci]_T \simeq [Ci^{3-}] = c$$

2.22. *Solubilité de l'hydroxyapatite.*

Nous avons choisi l'hydroxyapatite et non le phosphate tricalcique pour les raisons suivantes :

— certains auteurs doutent de l'existence du phosphate tricalcique (Van Wazer, 1958) ;

— l'hydroxyapatite possède la structure complète d'une apatite. Les canaux constitués par la structure cristallographique des apatites sont remplis par des ions $Ca^{++}$ et $OH^-$ dans la proportion de 1 $Ca^{++}$ pour 2 $OH^-$ et non par de l'eau adsorbée ou zéolitique (Montel, 1968) ;

— son produit de solubilité a été déterminé sur un composé fraîchement préparé et chimiquement pur (Clark, 1955), ce qui ne semble pas être le cas des produits de solubilités mesurés sur le phosphate tricalcique.

Nous tenterons de déterminer la quantité X d'hydroxyapatite qui peut être solubilisée à l'équilibre dans un litre d'une solution de citrate d'ammonium de concentration $c$, en fonction du pH ; pour cela, on dispose des données suivantes (1) :

— les équilibres de l'acide phosphorique

$$HPO_4^{2-} \rightleftarrows PO_4^{3-} + H^+ \qquad \frac{f_1 [H^+] f_2 [PO_4^{3-}]}{f_3 [HPO_4^{2-}]} = K_3 \qquad pK_3 = 12$$

$$H_2PO_4^- \rightleftarrows HPO_4^{2-} + H^+ \qquad \frac{f_1 [H^+] f_3 [HPO_4^{2-}]}{f_4 [H_2PO_4^-]} = K_2 \qquad pK_2 = 7{,}2$$

et

$$H_3PO_4 \underset{2}{\overset{1}{\rightleftarrows}} H_2PO_4^- + H^+$$

(1) La correspondance des facteurs d'activité est la suivante :

| | | |
|---|---|---|
| $f_1$ pour $H^+$ | $f_4$ pour $H_2PO_4^-$ | $f_7$ pour $CaCi^-$ |
| $f_2$ pour $PO_4^{3-}$ | $f_5$ pour $Ca^{++}$ | $f_8$ pour $OH^-$ |
| $f_3$ pour $HPO_4^{2-}$ | $f_6$ pour $Ci^{1-}$ | |

Ce dernier équilibre est complètement déplacé dans le sens 1, le pH des solutions étant supérieur à 7.

— la formation du complexe

$$Ca^{++} + Ci^{3-} \rightleftarrows CaCi^{-} \qquad \frac{f_5\,[Ca^{++}]\,f_6\,[Ci^{3-}]}{f_7\,[CaCi^{-}]} = Kc \qquad pKc = 4{,}8$$

— le produit de solubilité de l'hydroxyapatite

$$P = f_5^{10}\,[Ca^{++}]^{10} \times f_2^{6}\,[PO_4^{3-}]^{6} \times f_8^{2}\,[OH^{-}]^{2} = 10^{-115} \qquad (4)$$

d'où on obtient l'équation donnant X en fonction de la concentration et du pH (calculs en annexe 1)

$$X^{16} = \frac{10^{49}\,c^{10}}{6^{6}}\left[1 + \frac{f_1 f_2}{f_3}\frac{[H^+]}{10^{-12}} + \frac{f_1^2 f_2}{f_4}\frac{[H^+]^2}{10^{-19,2}}\right]^6 [H^+]^2\,\frac{f_6^{10} f_1^2}{f_7^{10} f_2^6}$$

Si on admet les facteurs d'activité égaux à 1 et $c = 1$, nous obtenons *une courbe X en fonction du pH* (fig. 1) et les points N, P et J pour les différents « citrates » (N pour le citrate neutre, P pour le citrate de Petermann et J pour le citrate de Joulie).

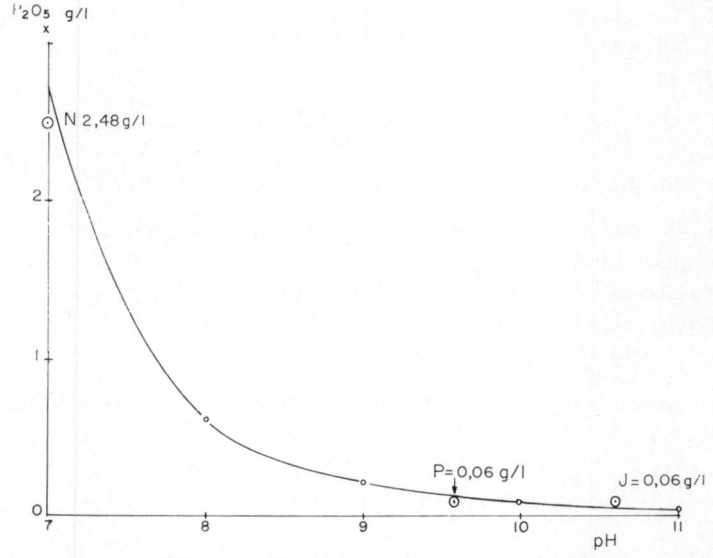



FIG. 1. — *Solubilité théorique de l'hydroxyapatite dans des solutions citriques molaires en fonction du pH* (cette courbe ne tient pas compte des facteurs d'activité).
x en $P_2O_5$ g/l = X (concentration en mole/l) × 3 × 142

Cette courbe permet de situer les différents points N, P, J et montre que le citrate neutre solubilise probablement une quantité non négligeable d'hydroxyapatite (conclusion qui correspond aux résultats expérimentaux obtenus avec le phosphate tricalcique et les phosphates naturels (1*a*). Il est cependant nécessaire de connaître l'influence des facteurs d'activité sur la forme de cette courbe ; pour ceci posons

$$K = \frac{10^{49}}{6^{6}} \text{ et examinons divers pH :}$$

1. *A pH 7,*

On peut négliger 1 devant les autres termes du crochet

$$X^{16} \simeq Kc^{10}\left[\frac{f_1 f_2}{f_3}\,10^5 + \frac{f_1^2 f_2}{f_4}\,10^{5,2}\right]^6 \times 10^{-14}\frac{f_6^{10} f_1^2}{f_7^{10} f_2^6}$$

Nous avons donc un terme de la forme $(a + b)^6$ qui est strictement supérieur à $a^6$, donc :

$$X^{16} > Kc^{10}\left[\frac{f_1 f_2}{f_3}\,10^5\right]^6 \times 10^{-14}\frac{f_6^{10} f_1^2}{f_7^{10} f_2^6}$$

$$X^{16} > Kc^{10}\frac{f_1^8 f_6^{10}}{f_7^{10} f_3^6}\,10^{16}$$

2. *A pH 10 et 11*

Outre le terme 1, le troisième terme du crochet est très faible vis-à-vis du second, et on a :

$$X^{16} \simeq Kc^{10}\left[\frac{f_1 f_2}{f_3}\frac{[H^+]}{10^{-12}}\right]^6 [H^+]^2\,\frac{f_6^{10} f_1^2}{f_7^{10} f_2^6}$$

soit

$$X^{16} \simeq Kc^{10}\frac{[H^+]^8 f_1^8 f_6^{10}}{10^{-72} f_3^6 f_7^{10}}$$

d'où *à pH 10*

$$X^{16} \simeq Kc^{10}\frac{f_1^8 f_6^{10}}{f_7^{10} f_3^6}\,10^{-8}$$

*et à pH 11*

$$X^{16} \simeq Kc^{10}\frac{f_1^8 f_6^{10}}{f_7^{10} f_3^6}\,10^{-16}$$

Nous remarquons à l'aide de ces équations que, si le facteur $F = \frac{f_1^8 f_6^{10}}{f_7^{10} f_3^6}$ est indépendant du pH pour des solutions de même concentration, la quantité X d'hydroxyapatite solubilisée diminue quand le pH augmente.

Or, nous savons que le facteur d'activité d'un ion ne dépend que de son environnement ionique. Dans notre cas, les ions en solutions sont :

$$Ci^{3-},\quad NH_4^+,\quad CiCa^-,\quad HPO_4^{2-},\quad OH^-,\quad H_2PO_4^-,\quad PO_4^{3-},\quad Ca^{++}$$

qui ont pour concentration dans des solutions de citrate de concentration $c$ variant de 0,7 à 2 M, mais de pH différents :

$$[Ci^{3-}] \simeq c - 10X \geqslant 0{,}7 - 10X$$
$$(1)\qquad [NH_4^+] \simeq c \geqslant 0{,}7$$
$$[OH^-] \leqslant 10^{-3}$$
$$[HPO_4^{2-}] \simeq 6X$$
$$[CaCi^-] \simeq 10X$$
$$[H_2PO_4^-] \simeq \varepsilon$$
$$[PO_4^{3-}] \simeq \varepsilon$$
$$[Ca^{++}] \simeq \varepsilon$$

Les « citrates » qui nous intéressent dans cette étude sont ceux qui nous permettent d'obtenir une séparation correcte des formes apatitiques du phosphate bicalcique. Pour remplir cette condition, on peut considérer qu'ils doivent solubiliser moins de

(1) $NH_4^+$ provenant de la dissolution de $NH_4OH$ est négligeable car l'ammoniaque est une base très faible.

$10^{-3}$ moles d'hydroxyapatite par litre (à peu près 1g/l) ; de ce fait, $X \leqslant 10^{-3}$ est négligeable par rapport à $c$, ce qui nous permet d'admettre avec une bonne approximation que l'*environnement ionique d'un ion est semblable pour des solutions de citrate d'ammonium de même concentration mais de pH différent* (la concentration des ions en quantités importantes restant constante et égale à $c$ pour les différents pH).

Le facteur $F = \frac{f_1^8 \, f_6^{10}}{f_7^{10} \, f_3^6}$ peut donc être considéré comme constant pour toute la partie de courbe où $X \leqslant 10^{-3}$ ; comme la courbe [1] $X_{(c)} = f(\text{pH})$ est décroissante, la zone pour laquelle $X \geqslant 10^{-3}$ ne peut se situer que vers les pH faibles.

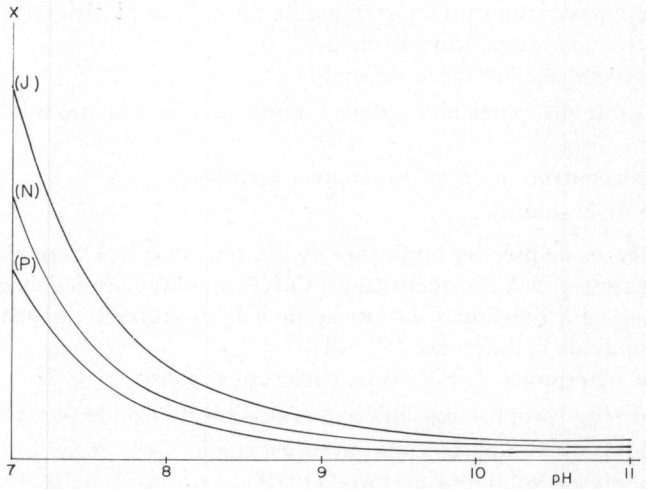



FIG. 2. — *Représentation des courbes* $X(c) = f$ (pH) *pour les concentrations en ions citriques* ($c$) *des citrates de Joulie* (J), *de Peterman* (P) *et du citrate neutre* (N).

Si on fait varier la concentration $c$, on obtient un faisceau de courbes $X_{(c)} = f$ (pH) (fig. 2) dont trois sont particulièrement intéressantes :

$c = 0{,}825$ concentration du citrate de Petermann (P)
$c = 0{,}88$ concentration du citrate neutre américain (N)
$c = 1{,}91$ concentration du citrate de Joulie (J)

Comme la solubilité croît en fonction de la concentration, on remarquera que le citrate de Petermann solubilise beaucoup moins d'hydroxyapatite que le citrate neutre.

Pour le citrate de Joulie, nous ne connaissons pas la variation du facteur $F = \frac{f_1^8 \, f_6^{10}}{f_7^{10} \, f_3^6}$ en fonction de la concentration ($c$ passe de 0,88 à 1,91) ; cependant, pour que la solubilité dans le citrate de Joulie soit égale à celle du citrate neutre, il faudrait une variation $\Delta F = 10^{27}$, ce qui est impossible malgré les exposants.

*Remarque* : une étude du même ordre pourrait être faite avec les autres orthophosphates apatitiques ; nous trouverions une courbe ayant une pente semblable à celle obtenue dans le cas présent, car celle-ci dépend de la proportion d'ions $PO_4^{3-}$ en solution par rapport au total des ions orthophosphoriques.

[1] $X_{(c)}$ : valeur de X pour une concentration $c$ donnée.

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE - CENTRE DE GRIGNON - CHAIRE DE PHYSICO-CHIMIE ET SCIENCE DU SOL

2.23. *Étude du phosphate bicalcique* ($CaHPO_4$)

La concentration en citrate des solutions étudiées étant supérieure à 0,7 mole/litre, on est certain que, théoriquement à l'équilibre il y a plus de $10^{-2}$ moles de $CaHPO_4$ solubilisées dans 100 ml.

Cependant, la dissolution du phosphate bicalcique dans les solutions de citrate d'ammonium étant lente, il est très intéressant du point de vue pratique de se placer dans des conditions permettant d'obtenir la meilleure vitesse de solubilisation tout en dissolvant une quantité aussi faible que possible des formes apatitiques. En effet, il n'est pas certain qu'un gramme de phosphate bicalcique soit dissout au bout de 24 heures à la température ordinaire.

Or, nous savons que la vitesse dépend :

— de la taille des particules : d'où l'intérêt d'avoir un produit aussi fin que possible (1) ;

— de la concentration du milieu en ions citriques ;

— du pH de la solution.

Nous tenterons de préciser l'influence de ces deux derniers facteurs.

Si l'on désigne par Y la quantité de $CaHPO_4$ solubilisée à l'équilibre et T la quantité solubilisée à l'instant $t$, la vitesse de solubilisation à cet instant $t$ est une fonction croissante de la différence (Y — T).

Il s'agit de déterminer Y. Pour cela, nous connaissons :

— les équilibres propres aux différentes acidités de l'acide phosphorique,

— l'équilibre du complexe $CaCi^-$ avec les anions $Ca^{++}$ et $Ci^{3-}$ (voir ci-dessus),

— le produit de solubilité de $CaHPO_4$ ($P = f_5 [Ca^{++}] f_3 [HPO_4^{2-}] = 10^{-6,4}$) d'où l'équation (calcul à l'annexe 2) :

$$Y^2 = \frac{10^{-6,4}}{f_5 f_3}\left[1 + \frac{f_5 f_6}{f_7}\frac{[Ci^{3-}]}{10^{-4,8}}\right]\left[1 + \frac{f_1 f_3}{10^{-7,2}}\frac{[H^+]}{f_4} + \frac{10^{-12} f_3}{f_1 f_2 [H^+]}\right]$$

Si on considère $[Ci^{3-}] = 1$ ion gramme/l et que l'on admette les facteurs d'activités égaux à 1, on obtient la courbe Y en fonction du pH (fig. 3).

Comme précédemment, nous allons essayer de démontrer que les facteurs d'activités sont analogues pour des solutions de même concentration $c$ mais ayant des pH différents. Pour cela, il convient de montrer que l'environnement ionique d'un ion est indépendant du pH de la solution.

Les concentrations en solutions sont :

$$\begin{aligned} [NH_4^+] &= c \\ [Ci^{3-}] &= c\text{-}Y \ (2) \\ [CaCi^-] &\simeq Y \\ [HPO_4^{2-}] &\simeq Y \\ [OH^-] &\leqslant 10^{-3} \end{aligned}$$

Les autres ions en solutions ($Ca^{++}$, $PO_4^{3-}$, $H_2PO_4^-$) peuvent être négligés.

Or, Y est du même ordre de grandeur pour des pH de 8 à 11, ce que l'on peut confirmer par l'expérimentation et par l'étude de la courbe

(1) Dans le cas contraire, les résultats peuvent être influencés par les détails du mode opératoire.
(2) Dans ce cas, Y n'est pas négligeable devant $c$.

Y = $f$(pH) (fig. 4). Nous pouvons donc admettre avec une bonne approximation que la concentration des ions en quantité non négligeable reste constante pour des citrates de concentration $c$ et que, par conséquent, les facteurs d'activité sont indépendants du pH pour des pH compris entre 8 et 11.

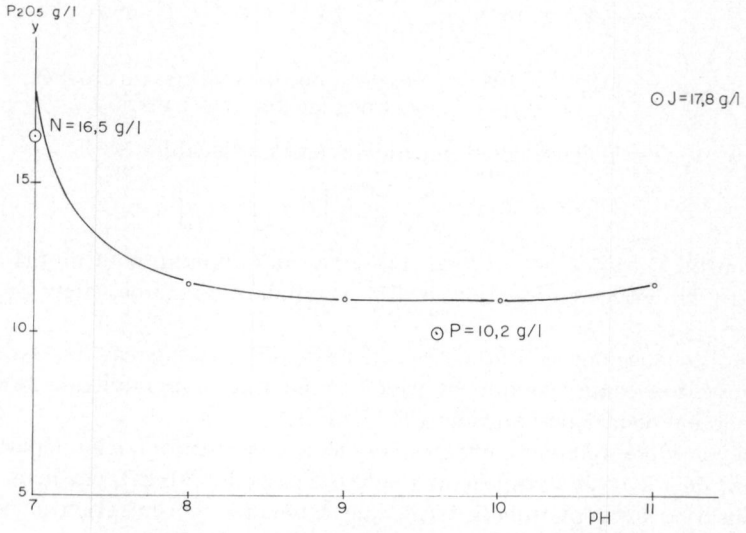



FIG. 3. — *Solubilité du phosphate bicalcique dans des solutions citriques de même concentration en ions $Ci^{3-}$ à l'équilibre* (un ion gramme/litre), *à des pH variables* (7 à 11).

y en $P_2O_5$ g/l. = Y (concentration en mole/l) × 0,5 × 142

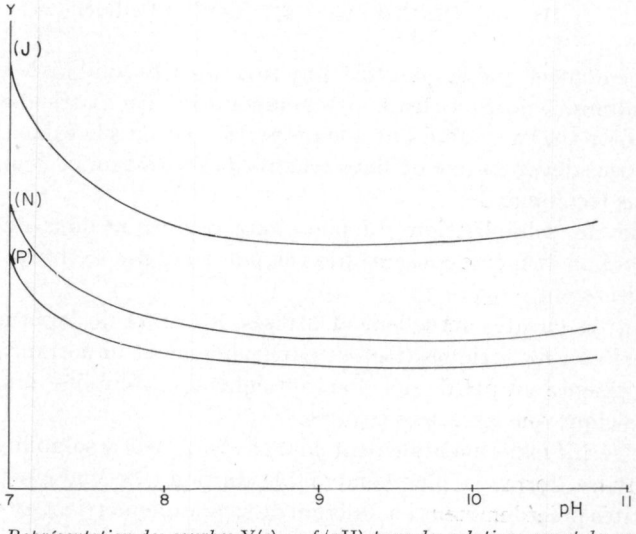



FIG. 4. — *Représentation des courbes* Y($c$) = $f$ (pH) *pour des solutions ayant des concentrations en ions citriques* ($c$) *égales à celles du citrate de Joulie* (J) *de Peterman* (P) *et du citrate neutre* (N).

Or, la formule générale devient, en négligeant 1 dans le premier crochet :

$$Y^2 \simeq 10^{-6,4} \frac{f_6}{f_7 f_3} \frac{[Ci^{3-}]}{10^{-4,8}} \left[1 + \frac{f_1 f_3}{f_4} \frac{[H^+]}{10^{-7,2}} + \frac{10^{-12}}{f_1 f_2} \frac{f_3}{[H^+]}\right]$$

*à* $pH = 8$, on peut également négliger le troisième terme du crochet :

$$Y^2 \simeq 10^{-6,4} \frac{f_6}{f_7 f_3} \frac{[Ci^{3-}]}{10^{-4,8}} \left[1 + 0{,}16 \frac{f_1 f_3}{f_4}\right]$$

*à* $pH = 10$

$$Y^2 \simeq 10^{-6,4} \frac{f_6}{f_7 f_3} \frac{[Ci^{3-}]}{10^{-4,8}}$$ (les deux derniers termes du crochet sont négligeables vis-à-vis de 1).

*et à* $pH = 11$, c'est le deuxième terme qui devient négligeable :

$$Y^2 \simeq 10^{-6,4} \frac{f_6}{f_7 f_3} \frac{[Ci^{3-}]}{10^{-4,8}} \left[1 + \frac{1}{10} \frac{f_3}{f_1 f_2}\right]$$

La courbe Y ($[Ci^{3-}]$) [1] $= f(pH)$ passe par un minimum pour un pH de l'ordre de 9,5 à 10, la dérivée en fonction de $[H^+]$ s'annulant pour une valeur de pH comprise entre 9,5 et 10.

Nous obtenons pour les différentes valeurs de $[Ci^{3-}]$ un faisceau de courbes (fig. 4) qui ne peuvent se couper, ce qui confirme l'augmentation de la vitesse de solubilisation en fonction de la concentration.

Si on considère différents citrates de même concentration $c$ au départ, mais de pH variant de 7 à 11 et auxquels on ajoute 0,1 mole de $CaHPO_4$ par litre, la vitesse de solubilisation $v$ du phosphate bicalcique à chaque concentration en ions $[Ci^{3-}] = c - T$ variera comme la différence $Y_{(c-T)} - T$.

Il en ressort, $Y_{(c-T)}$ étant, quel que soit T, minimum pour un pH compris entre 9,5 et 10, que la vitesse de solubilisation sera minimum pour les solutions ayant ces pH.

## III. — DISCUSSION ET CONCLUSION

On a pu démontrer que la quantité d'hydroxyapatite solubilisée par les citrates d'ammonium diminue lorsque leurs pH augmentent. En particulier, les citrates ayant des pH de 7 à 9 en solubilisent une proportion non négligeable. Ils ne peuvent donc pas être considérés comme de bons réactifs de séparation et l'emploi du citrate neutre n'est pas recommandé.

La vitesse de solubilisation du phosphate bicalcique dans des solutions de citrate d'ammonium de même concentration en ions citriques se trouve être minimum pour des pH situés entre 9,5 et 10.

Parmi les trois citrates actuellement utilisés, le citrate de Petermann qui est le moins concentré en ions citriques (facteur particulièrement important pour la vitesse de réaction), présente un pH de 9,6. Par conséquent, il solubilise plus lentement le phosphate bicalcique que les autres citrates.

Ce fait est vérifié expérimentalement par l'étude (2 *b*) de la solubilité du phosphate bicalcique anhydre (forme la plus défavorable du point de vue cinétique) dans les trois citrates cités précédemment en fonction de sa granulométrie. Cette étude montre

(1) Y ( ) valeur de Y à la concentration ( ).

que pour le citrate de Petermann, la quantité de phosphore solubilisé diminue en fonction de la dimension des grains, ce qui peut être la cause d'une mauvaise reproductibilité.

De plus, les résultats trouvés avec ce citrate sont en général inférieurs à ceux des autres citrates et en particulier dans le cas des phosphates bicalciques précipités (voir 2 *c*).

Pour augmenter la vitesse de solubilisation de ceux-ci, on a essayé d'augmenter la température. Mais la réaction de solubilisation étant exothermique, l'équilibre est déplacé défavorablement si bien que l'on trouve encore des résultats inférieurs (travail de la Délégation italienne à la C. E. E.) (1).

La comparaison des deux courbes $X = f(pH)$ et $Y = f(pH)$ permet de comprendre que l'on ait intérêt à se placer à des pH aussi élevés que possible, c'est-à-dire 10,6 à 10,8. En effet, pour des solutions de citrate d'ammonium de même concentration, mais de pH variant de 9 à 11, la solubilité de l'hydroxyapatite est plus faible et la vitesse de solubilisation du phosphate bicalcique plus grande pour les pH les plus élevés.

Notre travail a permis de déterminer les raisons des résultats divergents obtenus avec les différents citrates. Il montre, de plus, l'intérêt que l'on a à choisir un citrate ayant un pH aussi élevé que possible pour nous placer dans les conditions les plus favorables à une bonne séparation du phosphate bicalcique des formes apatitiques. Cependant, il reste à déterminer la concentration en ions citriques la plus adéquate ; pour cela, seule une étude expérimentale peut apporter une réponse satisfaisante, mais il semble que le citrate de Joulie soit une solution satisfaisante au problème posé.

*Reçu pour publication en janvier 1970.*

## SUMMARY

STUDY OF THE SEPARATION, BY MEANS OF CITRATES, OF CALCIUM ORTHOPHOSPHATES CONTAINED IN FERTILIZERS

The analysis of calcium orthophosphates in fertilizers with the help of ammonium citrate solutions shows that the results depend partially on the characteristics of the solution used.

This study, while underlining that this solubilization has value only in the case of calcium orthophosphates, allows to explain the causes of these differences. It tries to determine the parameters of the solution providing the best separation of dicalcium phosphate from the apatitic form and shows that it is of interest to use a solution having a high pH close to 10.6 which is the case with Joulie citrate.

## ZUSAMMENFASSUNG

MIT HILFE VON CITRATEN DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNG DER ABSCHEIDUNG DER IN DEN DÜNGEMITTELM VORHANDENEN KALKHALTIGEN ORTHOPHOSPHATE.

Die mit Hilfe von Ammoniumatratlösungen durchgeführte Analyse der in den Düngemittelm vorhandenen kalkhaltigen Orthophosphate zeigt, dass die Ergebnisse teilweise von den Charakteristiken der verwendeten Lösung abhängig sind.

(1) Non publié.

Diese, nur im Falle einer Auflösung von kalkhaltigen Orthophosphaten gültige Untersuchung, ermöglicht die Ursachen dieser Divergenzen zu erklären. Sie versucht die Lösungsparameter zu bestimmen, welche die beste Trennung des zweikalkigen Phosphates von den Apatiten erlauben und zeigt, dass es wichtig ist, eine Losüng mit einem hohen pH Wert (10,6) zu verwenden, was im Falle des Citrats von Joulie zutrifft.

*Изучение разделения известковых ортофосфатов удобрений при помощи лимоннокислых солей.*

И. БАРДЭН.

## РЕЗЮМЕ

Анализ известковых ортофосфатов удобрений, проведенный с помощью растворов лимоннокислого аммония показывает что полученные результаты частично зависят от характера применяемых растворов.

Данное изучение доказало что растворение имеет значение только в случае известковых ортофосфатов и позволило об'яснить причины этого отклонения. Авторы попытались также определить параметры раствора, благодаря которым возможно было-бы достичь лучшего разделения двузамещенного фосфата кальция различных форм апатитов, и указывают что представляет, может-быть, интерес, использование раствора с повышенной кислотностью, чего и достигается в случае применения лимоннокислой соли Жули.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

### ARTICLES

CLARK J. S., 1955. Solubility criteria for the existence of hydroxyapatite. *Canad. J. Chem.*, **33**, 1696-1700.

MONTEL G., 1968. Conceptions nouvelles sur la physico-chimie des phosphates de structure apatitique. *Bull. Soc. Chim.*, 1693-1699.

PEIRS S., NICOLE J., TRIDOT G., 1969. Mécanisme de la solubilisation des phosphates par les ions citrates. *Chimie Analytique*, **51** (1), 3-8.

VAN WAZER J. R., 1958. *Phosphorus and its compounds.* New York, Interscience Publishers Inc., vol. 1, p. 511.

### OUVRAGES

1 — 1960. *Les méthodes d'analyse des engrais dans les pays du Marché Commun. Étude comparative du dosage* de $P_2O_5$. Édition Jouve.

2 — 1965. *Les méthodes d'analyse des engrais dans les pays du Marché Commun. Étude de l'extraction du $P_2O_5$ par les réactifs citratés.* Édition Jouve.

*a*) Solubilisation des phosphates tricalciques précipités (Annexe, p. 127).

*b*) Étude des facteurs granulométrie et temps de contact sur le phosphate bicalcique anhydre (fig. p. 138).

*c*) Solubilisation du phosphate dicalcique dihydraté (fig. p. 114).

## ANNEXE I

Soit X le nombre de moles d'hydroxyapatite $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ pouvant se dissoudre dans 1 l.

Écrivons que le phosphore solubilisé se trouve sous la forme d'ions orthophosphoriques :

$$6\,X = [PO_4^{3-}] + [HPO_4^{2-}] + [H_2PO_4^{-}]$$

— Des équilibres de l'acide phosphorique, nous savons que :

$$[HPO_4^{2-}] = \frac{f_1 f_2}{f_3}\,\frac{[H^+]\,[PO_4^{3-}]}{10^{-12}} \qquad \text{et} \qquad [H_2PO_4^{-}] = \frac{f_1^2 f_2}{f_4}\,\frac{[H^+]^2\,[PO_4^{3-}]}{10^{-19,2}}$$

d'où

$$6\,X = [PO_4^{3-}]\left[1 + \frac{f_1 f_2\,[H^+]}{f_3\,10^{-12}} + \frac{f_1^2 f_2}{f_4}\,\frac{[H^+]^2}{10^{-19,2}}\right]$$

et

$$[PO_4^{3-}] = \frac{6X}{1 + \left[\dfrac{f_1 f_2}{f_3}\,\dfrac{[H^+]}{10^{-12}} + \dfrac{f_1^2 f_2}{f_4}\,\dfrac{[H^+]^2}{10^{-19,2}}\right]}$$

— Le calcium provenant de l'hydroxyapatite se trouve sous la forme d'ions $Ca^{++}$ et du complexe $CaCi^-$ :

$$10X = [Ca^{++}] + [CaCi^-] \qquad \text{or,} \qquad [CaCi^-] = \frac{f_5 f_6}{f_7}\,\frac{[Ca^{++}]c}{10^{-4,8}}$$

$$[Ca^{++}] = \frac{10X}{1 + \dfrac{f_5 f_6}{f_7}\,\dfrac{c}{10^{-4,8}}} \simeq \frac{10X}{10^{4,8} f_5 f_6 c}\,f_7$$

— Comme l'équilibre dû à la dénociation de l'eau est :

$$f_1 f_8\,[H^+]\,[OH^-] = 10^{-14} \qquad [OH^-] = \frac{10^{-14}}{f_1 f_8\,[H^+]}$$

— le produit de solubilité de l'hydroxyapatite

$$f_5^{10} f_2^6 f_8^2\,[Ca^{++}]^{10}\,[PO_4^{3-}]^6\,[OH^-]^2 = 10^{-115}$$

devient :

$$f_5^{10} f_2^6 f_8^2\,\frac{10^{10}\,X^{10} f_7^{10}}{10^{48} f_5^{10} f_6^{10} c^{10}} \times \frac{6^6 X^6}{\left[1 + \dfrac{f_1 f_2}{f_3}\,\dfrac{[H^+]}{10^{-12}} + \dfrac{f_1^2 f_2}{f_4}\,\dfrac{[H^+]^2}{10^{-19,2}}\right]^6} \times \frac{10^{-28}}{f_1^2 f_8^2\,[H^+]^2} = 10^{-115}$$

d'où l'équation :

$$X^{16} = \frac{10^{-49}\,c^{10}}{6^6}\left[1 + \frac{f_1 f_2}{f_3}\,\frac{[H^+]}{10^{-12}} + \frac{f_1^2 f_2}{f_4}\,\frac{[H^+]^2}{10^{-19,2}}\right]^6 [H^+]^2\,\frac{f_6^{10} f_1^2}{f_7^{10} f_2^6}$$

## ANNEXE II

Soit Y la quantité de phosphate bicalcique solubilisée à l'équilibre.

Écrivons que

— le phosphore solubilisé se trouve sous forme d'ions orthophosphoriques :

$$Y = [H_2PO_4^{-}] + [HPO_4^{2-}] + [PO_4^{3-}]$$

— Des équilibres de l'acide phosphorique, nous savons que :

$$[H_2PO_4^-] = \frac{f_1 f_3}{f_4} \frac{[H^+]\,[HPO_4^{2-}]}{10^{-7,2}} \qquad \text{et} \qquad [PO_4^{3-}] = 10^{-12} \frac{f_3}{f_1 f_2} \frac{[HPO_4^{2-}]}{[H^+]}$$

$$Y = [HPO_4^{2-}] \left[ 1 + \frac{f_1 f_3}{f_4} \frac{[H^+]}{10^{-7,2}} + 10^{-12} \frac{f_3}{f_2 f_1} \frac{1}{[H^+]} \right]$$

d'où

$$[HPO^3{}_4^-] = \frac{Y}{\left[ 1 + \frac{f_1 f_3}{f_4} \frac{[H^+]}{10^{-7,2}} + \frac{10^{-12}}{[H^+]} \frac{f_3}{f_1 f_2} \right]}$$

— Le calcium solubilisé se trouve sous la forme d'ions $Ca^{++}$ et du complexe $CaCi^-$ :

$$Y = [Ca^{++}] + [CaCi^-] \qquad Y = [Ca^{++}] \left[ 1 + \frac{f_5 f_6}{f_7} \frac{[Ci^{3-}]}{10^{-4,8}} \right]$$

d'où

$$[Ca^{++}] = \frac{Y}{\left[ 1 + \frac{f_5 f_6}{f_7} \frac{[Ci^{3-}]}{10^{-4,8}} \right]}$$

— Le produit de solubilité du phosphate bicalcique

$$P = f_5 f_3 [Ca^{++}]\,[HPO_4^{2-}] = 10^{-6,4}$$

devient :

$$f_5 f_3 \frac{Y}{\left[ 1 + \frac{f_5 f_6}{f_7} \frac{[Ci^{3-}]}{10^{-4,8}} \right]} \times \frac{Y}{\left[ 1 + \frac{f_1 f_3}{f_4} \frac{[H^+]}{10^{-7,2}} + \frac{10^{-12}}{[H^+]} \frac{f_3}{f_1 f_2} \right]} = 10^{-6,4}$$

d'où l'équation :

$$Y^2 = \frac{10^{-6,4}}{f_5 f_3} \left[ 1 + \frac{f_5 f_6}{f_7} \frac{[Ci^{3-}]}{10^{-4,8}} \right] \left[ 1 + \frac{f_1 f_3}{f_4} \frac{[H^+]}{10^{-7,2}} + \frac{10^{-12}}{[H^+]} \frac{f_3}{f_1 f_2} \right]$$

*Ann. agron.* 1970, **21** (1), 109-112.

# CHRONIQUE DES LIVRES

OLLIER (C.). — WEATHERING. — Edinburgh, Oliver and Boyd, 1969, 304 p.

Il s'agit d'un volume en langue anglaise sur l'altération à la surface du globe, paru dans une série consacrée à la géomorphologie. L'optique du livre s'en ressent et l'accent sera mis plus volontiers sur les répercussions géomorphologiques de l'altération que sur les processus ou les transformations minéralogiques qui peuvent en résulter.

Ce livre comprend une quinzaine de chapitres traités d'ailleurs d'une façon indépendante.

Dans les premiers chapitres, l'auteur considère tout d'abord quelques aspects classiques (physique, chimique ou biologique) de l'altération des minéraux et des roches ; puis il insiste sur deux composantes principales de l'environnement, l'hydrologie et le climat.

L'auteur étudie ensuite les répercussions de cette altération, aussi bien dans la zone profonde, que dans la zone superficielle sur la formation des sols ou sur l'évolution du paysage.

Les derniers chapitres sont consacrés d'une part à la notion de vitesse d'altération, d'autre part à quelques données sur l'altération à travers les temps géologiques. Un chapitre est consacré enfin à l'exposé succinct de quelques techniques (analyses mécaniques et minéralogiques, expression des indices d'altération...).

Ce livre apporte donc un grand nombre de données sous une forme assez simple et abondamment illustrée (photographies, schémas), avec des observations et des exemples choisis dans les différentes régions du monde ; on peut quand même regretter que l'effort de synthèse entre ces différentes données n'ait pas été plus important.

M.R.

HÉNIN (S.), GRAS (R.) et MONNIER (G.). — LE PROFIL CULTURAL. — Paris, Masson, 1969, 332 p.

Voilà près de 5 ans que la première édition du « Profil cultural » est épuisée. Les auteurs ont donc entrepris de faire rééditer ce livre, mais ils l'ont profondément modifié, en tenant compte des réactions des lecteurs de la première édition. C'est ainsi que si le cadre général de l'ouvrage a été conservé, ainsi que l'essentiel des illustrations, presque tous les chapitres ont été réécrits.

Pour chacun, une présentation d'ensemble permet d'évoquer les divers problèmes concernés. Puis les éléments ainsi rassemblés sont étudiés séparément, en tenant compte des observations et des principaux résultats expérimentaux dont on dispose actuellement.

Les chapitres concernant la description du profil cultural, la stabilité de la structure, la valeur agronomique de cette méthode ont pu être ainsi sensiblement améliorés. Les problèmes concernant le travail du sol, la matière organique et son utilisation et enfin l'étude des systèmes de culture sont présentés sous un jour tout à fait nouveau. Des illustrations et des graphiques supplémentaires rendent la compréhension de l'ouvrage plus aisée.

Cette nouvelle édition, ainsi complétée peut intéresser de nombreuses catégories de lecteurs.

TUNEVALL (G.), ed. — PERIODICALS RELEVANT TO MICROBIOLOGY AND IMMUNOLOGY. — A world list, 1968. — London, John Wiley, 1969, 73 p.

Le Comité permanent pour la Documentation microbiologique et immunologique, fondé en 1958 par l' « International Association of Microbiological Societies », demanda, en 1961, à l'auteur, secrétaire de ce Comité, d'établir un répertoire mondial des périodiques intéressant la microbiologie et l'immunologie.

Ce répertoire couvre environ 700 périodiques, de 35 pays, qui publient régulièrement ou de temps à autre, des articles relatifs à la microbiologie ou à l'immunologie à propos soit de questions scientifiques (médecine, médecine vétérinaire, art dentaire, hygiène générale, agriculture, sylviculture, limnologie et disciplines connexes telles que la biochimie, la génétique, etc.), soit d'applications industrielles, (industries alimentaires, brasserie, fermentation, production d'antibiotiques, etc.).

GANDER (R.). — PHOTOMICROGRAPHIC TECHNIQUE FOR MEDICAL AND BIOLOGICAL SCIENTISTS — New York, Hafner publish. Cy, 1969, 106p. — Traduit de l'allemand par FREERE (R. H.)

Cet ouvrage, très simple, est le résultat d'observations faites lors de cours de microscopie et lors du travail quotidien effectué au laboratoire de microscopie appliquée.

L'auteur schématise toute la technique de la microphotographie en contraste de phase, et illustre son ouvrage d'exemples pris dans le domaine médical, biologique et botanique. Il énonce les titres des chapitres de son ouvrage dans la première phrase : « Prenez une préparation microscopique, propre, éventuellement colorée et un bon microscope, avec une lampe, un appareil photo et un film. Puis sélectionnez les accessoires optiques, choisissez le temps optimum d'exposition, faites jouer le déclic, et la microphotographie est prise, négative ou positive, il n'y a plus qu'à développer, tirer et agrandir. C'est aussi simple que cela... » Et, en fait, on a l'impression en terminant la lecture de l'ouvrage que l'on est à même de faire une bonne microphotographie.

GOUNOT (M.). — MÉTHODES D'ÉTUDE QUANTITATIVE DE LA VÉGÉTATION. — Paris, Masson, 1969, 314 p.

Actuellement, deux tendances principales s'affrontent dans l'étude de la végétation. En Europe continentale, domine assez largement une conception « phytosociologique » issue des travaux des grands phytogéographes du siècle dernier et mise en forme par BRAUN-BLANQUET et ses élèves. Elle est préoccupée plus de floristique que de physiologie et d'applications pratiques que de perfectionnement théorique.

Dans les pays anglo-saxons et au Japon, au contraire, un grand effort théorique a été fait depuis la guerre surtout dans le domaine de l'étude quantitative, avec le perfectionnement des méthodes statistiques, stimulé (mais non créé) par les nouvelles possibilités fournies par les ordinateurs.

Le but de ce livre est précisément de tenter une mise au point et une synthèse des théories et des méthodes en présence dans le langage statistique. Pour cela, l'auteur s'est très largement inspiré de son expérience personnelle qui l'a conduit, d'une part, à pratiquer sur une grande échelle l'inventaire phytosociologique et la cartographie, sur la base de la méthode de BRAUN-BLANQUET puis de celle des groupes écologiques, d'autre part à diriger la section de Phytosociologie théorique et expérimentale du C. E. P. (Centre d'Études phytosociologiques et écologiques du C. N. R. S.) où il a effectué et rédigé des études statistiques à orientation théorique.

L'ouvrage part d'une réflexion qualitative sur la nature de la végétation (chap. 1) qui impose un certain nombre de conditions à l'étude statistique ; conditions qui doivent être respectées si l'on veut éviter de grossières erreurs de méthodes.

Dans une première partie (chap. 2 à 6) les principes de l'analyse statistique au niveau de la parcelle ont été développés en insistant sur la notion de « modèle » comme outil théorique et sur les concepts controversés d'homogénéité et d'aire minimale.

La seconde partie (chap. 7 à 13) est consacrée aux méthodes de comparaison des communautés végétales en vue de la classification et de l'ordination. Contrairement aux manuels courants, l'auteur s'est efforcé de donner une idée précise des différentes méthodes, en insistant sur les plus répandues ou les plus prometteuses (méthode de BRAUN-BLANQUET, groupes écologiques, études des associations interspécifiques, analyse différentielle, continuum, etc.). L'analyse approfondes de leurs postulats théoriques et leur traduction statistique ont fourni à l'auteur la base d'un modèle statistique simple, mais très général, susceptible, suivant la nature des données, de se particulariser en l'une ou l'autre des méthodes précédentes (chap. 11). Un chapitre est consacré à l'analyse multivariable (chap. 12), qui est en train de révolutionner les méthodes d'étude de la végétation.

Dans la troisième partie est abordé le problème de la classification et de l'ordination à l'échelle régionale et supra-régionale, ce qui pose le problème des rapports entre phytosociologie et phytogéographie et celui de la définition précise des régions naturelles.

La quatrième partie est consacrée à l'application des méthodes statistiques à l'analyse de la végétation. L'auteur s'est contenté d'expliquer en détail certaines méthodes simples, insuffisamment traitées dans les manuels courants (test exact pour les tables de contingence 2 × 2, tests non paramétriques), et de préciser les conditions particulières d'adaptation des méthodes classiques à l'étude de la végétation.

EASTIN (J. D.), HASKINS (F. A.), SULLIVAN (C. Y.), VANBAVEL (C. H. M.), ed. — PHYSIOLOGICAL ASPECTS OF CROP YIELD. — Proceedings of a symposium sponsored by the University of Nebraska, the American Society of Agronomy, and the Crop Science Society of America, and held at the University of Nebraska, Lincoln, Nebr., January 20-24, 1969. Madison (Wisc.) American Society of Agronomy, Crop Science Society, of America, 1969, 396 p.

Ce symposium a été consacré aux possibilités d'augmentation de la production agricole et à l'influence de l'environnement.

Les communications ont été les suivantes :

1. Méthodes d'analyse des ressources naturelles et des rendements.
2. Techniques pour une plus grande productivité.
3. Productivité et morphologie des récoltes : modèles avec des feuilles.
4. Rôle physiologique des relations entre teneur en eau et rendement.
5. Interception de la lumière et échanges de radiations dans les cultures.
6. Échanges gazeux dans les cultures.
7. Mécanismes de la translocation des produits du métabolisme chez les plantes.
8. Aboutissement du métabolisme.
9. Interrelations entre photosynthèse, respiration et mouvement du carbone dans les plantes en cours de développement.
10. Mécanismes de la fixation du carbone et des réponses physiologiques associées.
11. Réponses physiologiques à l'azote.
12. Morphologie de la plante et géométrie des plantations en relation avec l'azote.
13. Développement, différenciation et rendement.
14. Techniques culturales pour l'obtention de hauts rendements.
15. Action sur l'environnement pour l'obtention de hauts rendements.
16. Utilisation du plasma germinatif dans l'avenir.

SMILDE (K. W.) and ROORDA VAN EYSINGA (J. P. N. L.). — NUTRITIONAL DISEASES IN GLASSHOUSE TOMATOES. — Wageningen, Centre for agricultural Publishing and Documentation, 1969, 48 p.

Cet ouvrage est un guide pour reconnaître les symptômes des maladies de nutrition chez la tomate de serre. Il traite à la fois des maladies de carence minérale et des facteurs de toxicité.

Quatre méthodes sont habituellement utilisées pour déterminer la nature de ces maladies. Ce sont :

1. l'analyse de la plante,
2. l'analyse du substrat,
3. l'étude de la réponse des plantes à des éléments nutritifs appliqués au sol ou à la plante elle-même,
4. l'étude des symptômes apparents.

Dans bien des cas, un diagnostic ne peut être correctement effectué qu'en faisant appel aux diverses méthodes à la fois.

Cette publication est basée sur les méthodes de l'analyse de la plante et sur l'observation des symptômes. Des planches en couleur accompagnées de la description des symptômes montrent les effets de carences en azote, phosphore, potassium, magnésium, calcium, soufre, bore, cuivre, manganèse, molybdène, fer et zinc, ainsi que la toxicité due au bore, manganèse, zinc et aluminium.

Outre la description des symptômes, chaque chapitre comporte la description des conditions dans lesquelles la maladie se développe et les méthodes pour la prévenir et la guérir.

J. L.

ROORDA VAN EYSINGA (J. P. N. L.) and SMILDE (K. W.). — NUTRITIONAL DISORDERS IN CUCUMBERS AND GHERKINS UNDER GLASS. — Wageningen, Centre for agricultural Publishing and Documentation, 1969, 46 p.

Cet ouvrage constitue un guide pour le diagnostic des troubles de la nutrition des concombres et des cornichons cultivés sous serre.

Les études faites portent sur les déficiences en azote, phosphore, potassium, magnésium, calcium, soufre, bore, cuivre, manganèse, molybdène, fer et zinc, et sur les toxicités liées aux excès d'azote, bore, manganèse et zinc.

Pour chacune des maladies, des planches en couleur accompagnent le texte qui donne une description des symptômes visibles, une analyse de la plante malade, les causes et les moyens de contrôle.

Un tableau à la fin du livre donne la composition chimique des plants sains de concombres et de cornichons.

M.F.

# RECOMMANDATION AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

*Au début de chaque mémoire*, on indiquera : — *le titre du mémoire:* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

*Les mémoires* seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* suffisamment précis (250 mots max.) pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible; e) *discussion et conclusion;* f) *résumé* en anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds les dons...; h) *références bibliographiques.*

*Les travaux originaux en anglais* doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

*Pour les autres documents* (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

*Les références bibliographiques* doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

*Pour les articles :* le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) : le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

*Pour les ouvrages :* le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

*Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies*, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée et porter les numéros des figures.

*Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils* seront envoyés *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 19 × 12,5 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

*Photographies :* Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12,4 photos 9 × 5,5,6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

*Correction des épreuves 1* : les auteurs recevront une épreuve à corriger.

*Envoi du manuscrit :* M. Henin, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

*Le directeur de la publication :* M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 7-1970

*Dépôt légal : 1er trimestre 1970. N° d'impression : 704.*

# ANNALES
# AGRONOMIQUES

VOLUME 21 1970 NUMÉRO 2

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, PARIS-7e

*Ann. agron.*, 1970, **21** (2), 119-157.

# CONTRIBUTION A L'ÉTUDE PÉDOLOGIQUE ET AGRONOMIQUE DES SOLS ARGILEUX DU BASSIN PARISIEN — LA HAUTE-BRIE

M. JAMAGNE*, L. BLIET et J.-C. RÉMY

* *Station de Cartographie des Sols,*
*Centre national de Recherches agronomiques, 78-Versailles*
*Station agronomique, 02 - Laon*
*Institut national de la Recherche agronomique*

## RÉSUMÉ

Les formations argileuses de Haute-Brie occupent les bordures de plateau, en rupture de pente, ou constituent d'importants affleurements sur versants.

Un climat du type atlantique n'a pas créé sur ces matériaux des conditions marquées de lessivage.

Ces sols argileux présentent une assez grande diversité essentiellement liée à leur origine. Sommairement, ils peuvent être classés en deux grands groupes correspondant l'un aux formations sédimentaires peu modifiées et aux argiles à meulière, l'autre provenant d'une altération importante de matériaux calcaires.

Les argiles sédimentaires plus compactes et moins bien structurées présentent le plus souvent des phénomènes d'asphyxie et d'endohydromorphie. Les argiles issues de l'altération des calcaires présentent au contraire une structure très favorable pouvant aller jusqu'à l'apparition en surface de caractères « molliques ».

Il a pu être observé l'apparition progressive de caractères « vertiques » lorsque l'indice de plasticité est suffisant et le complexe saturé. Une tendance au lessivage peut cependant apparaître dans les sols les moins lourds sous la forme de revêtements argileux peu importants. Généralement, seule la structure plus marquée à un certain niveau dans le profil permet de définir un horizon (B).

Tous les sols observés appartiennent donc soit à la classe des sols brunifiés, soit à celle des sols calcimagnésiques.

Ces formations lourdes présentent toutes des difficultés de travail du sol, accrues ou non par la présence d'hydromorphie. Les labours effectués à l'automne doivent être repris superficiellement au printemps au cours de la période de ressuyage très courte. Dans certains cas, les céréales pourraient être implantées sans labour.

Malgré certaines similitudes propres à tous les sols argileux, des particularités bien marquées dissocient des sols différents, tant sur le plan pédologique qu'agronomique, qu'il est important de délimiter et de décrire dans une cartographie à grande échelle et une étude détaillée des sols.

## I. — DONNÉES GÉNÉRALES

Une des caractéristiques principales de la région naturelle constituée par le très important plateau entre Marne et Morin est la présence de nombreux matériaux

très lourds dans les formations superficielles. Ces terres constituent en effet les trois quarts des superficies situées en bordure des plateaux et sur les pentes des vallées plus ou moins fortement incisées.

Certaines d'entre elles sont constituées par des formations autochtones, d'autres sont des produits de déplacement relativement anciens.

Leur étude prend dans cette région une importance certaine étant donnés :

— les difficultés de travail du sol,

— la perméabilité très variable de ces formations, selon leur origine, et les problèmes d'assainissement qui y sont fréquemment liés,

— la présence de nappes aquifères temporaires influençant les matériaux de couverture lorsque certains niveaux lourds sont situés à faible profondeur,

— le problème de la classification de ces sols.

Ces formations argileuses de la Haute-Brie appartiennent essentiellement aux niveaux géologiques suivants (POMEROL et FEUGUEUR, 1963) :

*Oligocène* : *Sannoisien* : argiles à meulière, argiles vertes.

*Éocène* : *Bartonien* : zone III ou *Ludien* : marnes supragypseuses et travertin de Champigny, zone II ou *Marinésien* : calcaires marneux de Saint-Ouen.

Le *climat* de la région étudiée est du type atlantique, il est donc assez humide et frais.

Cependant, des sécheresses exceptionnelles et des froids très rigoureux peuvent s'observer certaines années.

L'influence océanique se marque de manière prépondérante par le passage de dépressions cycloniques, les masses d'air frais et humide se déplaçant d'ouest en est. Les vents dominants sont donc d'ouest et sud-ouest, assez souvent également du nord-ouest (printemps) alors que les vents du nord et de l'est à sud-est ne sévissent que durant les périodes de froid sec prolongé ou de grande chaleur.

### *Température*

Moyennes mensuelles et moyenne annuelle sur 12 ans en degrés Celsius à Pargny-la-Dhuys :

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Janvier | 1,9 | Avril | 8,7 | Juillet | 17,2 | Octobre | 10,0 |
| Février | 2,3 | Mai | 12,0 | Août | 16,3 | Novembre | 5,1 |
| Mars | 5,6 | Juin | 15,3 | Septembre | 14,6 | Décembre | 3,5 |

*Année* : *9,5°*.

L'amplitude, écart entre la moyenne du mois le plus froid et celle du mois le plus chaud, étant de 15,3°, nous avons affaire à un climat modéré.

Des températures exceptionnellement basses peuvent s'observer au cours des mois de décembre, janvier et février.

Les gelées tardives des mois de mars, avril et mai sont, certaines années, à l'origine de dégâts culturaux très importants.

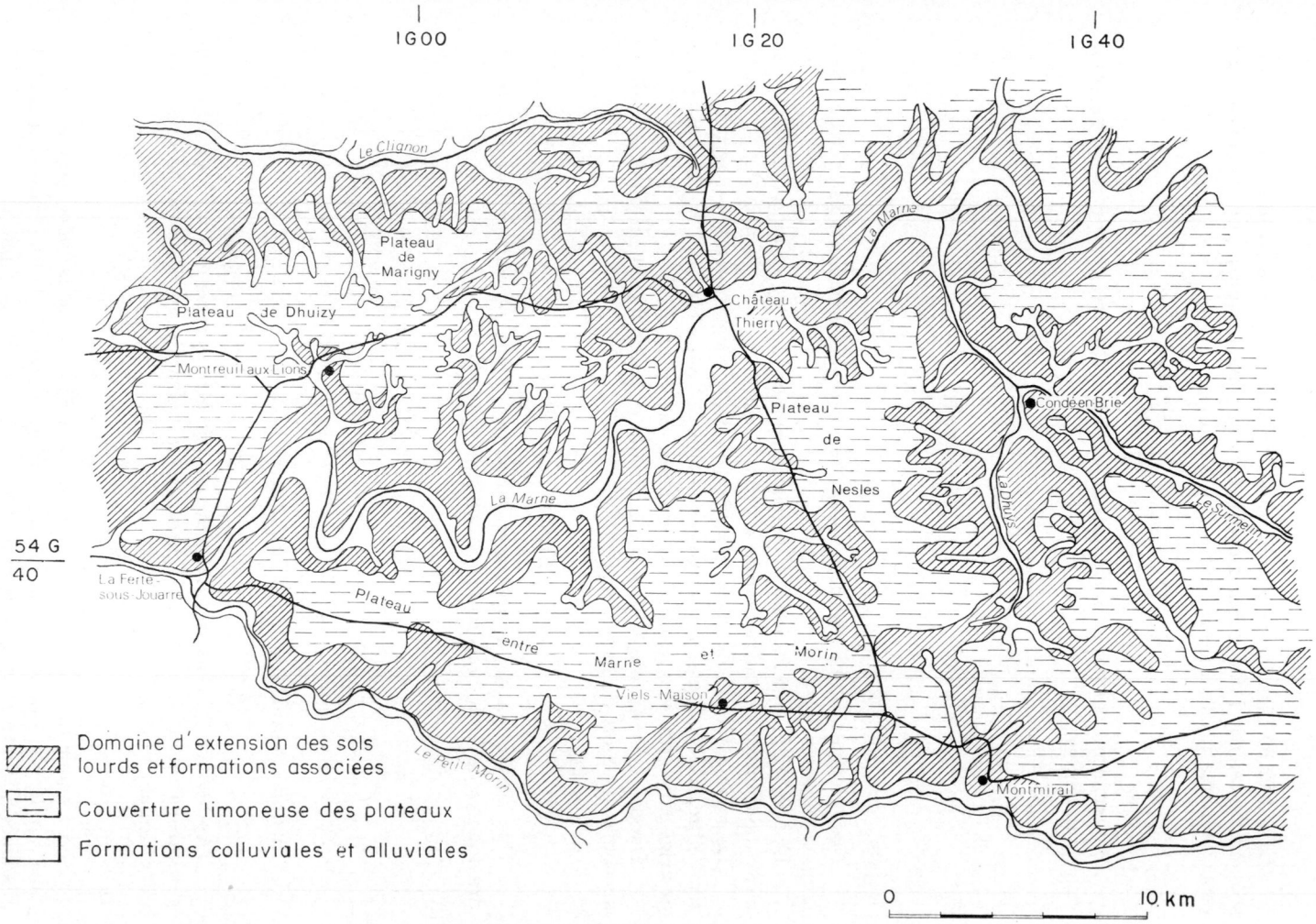



FIG. 1. — *Esquisse de répartition des principales formations superficielles de Haute Brie*

*Insolation*

La valeur de l'insolation est moyenne, mais il semble que sa durée soit le plus souvent nettement inférieure à 2 000 heures par an. Certains mois chauds voient cependant une insolation supérieure à 200 heures.

*Précipitations*

Moyennes mensuelles et moyenne annuelle en millimètres calculées sur 12 ans à Pargny-la-Dhuys :

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Janvier | 77 | Avril | 40 | Juillet | 58 | Octobre | 62 |
| Février | 66 | Mai | 57 | Août | 60 | Novembre | 61 |
| Mars | 51 | Juin | 57 | Septembre | 60 | Décembre | 75 |

*Moyenne annuelle : 724 mm.*

Nous constatons une répartition assez régulière des précipitations avec un minimum marqué en avril.

Le nombre moyen de jours de précipitations est de 155, ce qui nous donne une moyenne d'intensité journalière de 4,5 mm d'eau.

La somme des précipitations pour la période de végétation intense, soit d'avril à septembre, s'élève à 332 mm à Pargny-la-Dhuys, ce qui est assez faible. Les chutes de neige et de grêle sont assez rares dans la région.

D'assez violents orages peuvent se produire, particulièrement dans les vallées, au cours des mois de mai à septembre.

*Évapotranspiration*

Une estimation de l'évapotranspiration potentielle moyenne, effectuée à partir des données de TURC nous fournit les chiffres suivants :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Avril | 61 | Juillet | 111 |
| Mai | 90 | Août | 95 |
| Juin | 107 | Septembre | 67 |

En année normale, le déficit en eau serait donc de :

$$506 - 332 = 174 \text{ mm.}$$

Des nuances parfois importantes peuvent être enregistrées au sein du climat général par suite de situations particulières d'altitude ou d'exposition créant des microclimats locaux.

*Drainage calculé*

La formule du drainage calculé (HÉNIN et AUBERT) nous donne, pour les formations argileuses, une valeur de 121 mm, ce qui correspond à une transition entre la tendance à la formation de sols bruns et un lessivage très peu marqué.

## II. — MATÉRIAUX ORIGINELS

### 2.1. — *Les argiles sannoisiennes*

Elles se présentent sous deux aspects différents, à savoir :

— les *argiles à meulières* de l'étage du calcaire de Brie, Sannoisien supérieur, issues de processus d'altération très anciens,

— les *argiles vertes*, plus ou moins marneuses du Sannoisien inférieur, qui passent insensiblement aux marnes supragypseuses sous-jacentes et qui sont le plus souvent de couleur verdâtre.

Elles peuvent être plus ou moins chargées en minces dépôts de calcaire marneux et restent souvent très imperméables.

Ces formations affleurent principalement sur toute la bordure des plateaux et hauts de pentes où on les trouve sur pentes convexes parfois assez accusées ; partout ailleurs, elles sont recouvertes d'une épaisseur variable de produits limoneux soliflués, suivant l'intensité de la pente.

Nous observons fréquemment des teneurs assez élevées de la fraction 20 à 50 μ, particulièrement pour les argiles à meulières, les teneurs en sable étant faibles à très faibles pour toutes ces formations. Les argiles à meulières sont principalement de texture argilo-limoneuse, les argiles vertes sont des argiles lourdes.

La moyenne des capacités d'échange pour les argiles à meulières est de 18 méq. pour 100 g de sol et le pH voisin de 6 ; pour les argiles vertes et marnes, elle est sensiblement plus élevée ; en moyenne 25 méq. pour les capacités d'échange et 7 à 8 pour les pH. Notons la grande richesse en bases échangeables de ces dernières, particulièrement en ce qui concerne Ca et K.

Les analyses aux rayons X ont indiqué pour les argiles à meulières un mélange d'Illite et de Montmorillonite partiellement interstratifiées, avec prédominance de Montmorillonite.

Les argiles vertes contiennent un mélange d'Illite et de Montmorillonite où, là aussi, la Montmorillonite paraît la plus abondante.

### 2.2. — *Les argiles bartoniennes*

Nous avons affaire le plus souvent à des argiles d'altération ou de dissolution de calcaire : d'une part celles issues du calcaire ou travertin de Champigny, calcaire dur, siliceux, et d'autre part celles provenant de l'altération des calcaires de Saint-Ouen, fissurés et souvent empâtés dans des formations marneuses.

Au contact avec le Sannoisien, nous observons de plus un niveau très lourd, marneux, contenant fréquemment des quantités appréciables de gypse.

Le *travertin de Champigny*, à la suite d'une altération assez ancienne, a le plus souvent donné des argiles lourdes, de couleur brun rougeâtre très caractéristique, et très bien structurées en général.

Ces argiles sont souvent décarbonatées jusqu'à la roche-mère, et de texture parfois excessivement fine, quelquefois de l'ordre de 80 p. 100 d'argile.

Les *calcaires de Saint-Ouen*, très largement répartis, donnent des sols argileux à limono-argileux souvent très calcarifères. De plus, une certaine quantité de marne se trouve bien souvent mêlée au matériau argileux. Ce calcaire est en effet très impur et les bancs rocheux discontinus sont noyés dans des matériaux lourds, bariolés, tantôt très argileux et non calcaires (argiles vert sombre très lourdes), tantôt fortement calcarifères et à texture poudreuse.

Les taux d'argile sont nettement moins élevés pour les formations issues du calcaire de Saint-Ouen, certains échantillons présentant d'autre part une teneur en calcaire fin élevée augmentant assez fortement le taux des fractions très fines. Des textures légèrement sableuses proviennent de l'hétérogénéité du calcaire qui est fin, grossier ou graveleux.

Les capacités d'échange sont élevées et ces formations contiennent une réserve importante en bases. On peut noter la richesse en magnésium échangeable des produits d'altération du calcaire de Saint-Ouen.

L'analyse minéralogique d'une argile d'altération du calcaire de Saint-Ouen a révélé la présence d'Illite d'une manière prépondérante ; celle des matériaux liés à la présence du travertin de Champigny décèle la présence de mélanges Illite/Montmorillonite interstratifiés, avec prédominance de Montmorillonite.

## III. — LES SOLS

### 3.1. — *Sols argilo-limoneux dérivés des argiles à meulières du Sannoisien*

Ces sols sont assez fréquemment peu profonds, quelquefois très superficiels sur cailloutis de meulière. L'enracinement peut cependant s'y effectuer grâce aux discontinuités du sous-sol.

Ils peuvent donc être très caillouteux et compacts. De nombreuses surfaces cultivées ont été épierrées et approfondies progressivement, tandis que de grands blocs ont également été extraits pour la construction.

La profondeur ainsi remuée et rendue cultivable ne dépasse cependant guère 30 à 40 cm. En certains endroits, des apports argileux peuvent avoir remblayé de petites dépressions, ou recouvert localement certains replats ; on trouve alors sur un socle meulier compact une épaisseur de terre un peu plus importante (60 à 80 cm), mais toujours fortement chargée en cailloux.

Ce sont des *sols bruns* ou *sols bruns oligotrophes* du type A/(B)/C, un horizon structural se dissociant toujours assez nettement dans le solum. L'hydromorphie est toujours très fortement marquée.

On note cependant, dans les sols les plus profonds, la présence de revêtements argileux très fins et discontinus, témoins d'un lessivage peu important. Lorsqu'une influence limoneuse marquée s'observe dans les couches supérieures, ces phénomènes peuvent naturellement prendre un peu plus d'ampleur.

Dans la classification américaine (1), ces sols correspondent soit à des *Dystrochrepts typiques, aquiques* ou *umbriques*, soit à des *Eutrochrepts aquiques* ou *dystriques*, soit encore, mais beaucoup plus rarement, à des *Haplumbrepts*, *Humaquepts* ou *Haplaquepts*, ces derniers dans les stations les plus humides.

(1) Selon définition de la classification américaine *7th Approximation of Soil Classification*, 1960-67.

En effet, le seul horizon diagnostique décelable d'une manière constante est un horizon B « cambique » (1) bien différencié, correspondant au (B) que nous avons mentionné plus haut.

Sous végétation naturelle forestière, l'horizon humifère a une teneur en matière organique généralement comprise entre 4 et 8 p. 100, à rapport C/N de l'ordre de 11 à 12. Le taux de saturation est variable, on enregistre des valeurs allant de 60 à 100 p. 100. La structure en est généralement polyédrique subangulaire, grumeleuse très localement.

Ces sols ont, en profondeur, un pH voisin de la neutralité. Le profil détaillé ci-après est assez représentatif de cette unité.

*Localisation* — Carte Montmirail 3, profil n° 8. Près « Les Tropins ». Nord-est de Fontenelle-en-Brie.

*Végétation* — Bois. Taillis sous futaie à réserve de chênes et frênes. Quelques épicéas, bouleaux, charmes, grisards, coudriers. La strate herbacée comprend essentiellement des carex, de la deschampsie cespiteuse et de la molinie.

*Topographie* — Relief normal. Faible pente à exposition ouest. Altitude : 210 m.

*Économie en eau* — Écoulement superficiel : lent.
Drainage interne faible.

*Activités biologiques* — Bonnes dans l'$A_1$ et l'$A_3$, moyennes ensuite.

*Pierrosité* — Moyenne.

*Classification* — — Sol brun à pseudo-gley.
— Eutrochrept dystrique, aquique.
— *Série* : XA-4*b*.

$O_1$ — L : couche peu importante (fanes de chênes).

$O_2$ — F : très peu importante et localisée.
H : nulle.

$A_1$ 0-5 cm — Limon argileux gris brun très foncé (10 YR 4/2). Humide. Teneur importante en matière organique. Quelques grosses racines, nombreuses petites. Quelques cailloux de meulière. Structure grumeleuse moyenne faiblement développée dans le feutrage radiculaire, tendance polyédrique subangulaire à la partie inférieure de l'horizon. Friable à ferme, légèrement compact localement. Assez nombreux grumeaux coprogènes. Limite distincte et régulière.

$A_3$ 5-17 cm — Argile limoneuse brun clair (10 YR 5/3). Humide. Teneur assez importante en matière organique. Racines assez nombreuses, grosses et petites. Cailloux plus nombreux. Quelques taches d'oxydation (recouvrement de 5 p.100 environ). Structure polyédrique subangulaire à angulaire localement, moyenne, assez faiblement développée. Assez ferme. Quelques conduits de lombricides et grumeaux coprogènes. Limite distincte et régulière.

$B_1g$ 17-33 cm — Argile limoneuse, matrice brun jaune (10 YR 5/4), oxydation brun jaune (10 YR 5/6), réduction gris brun pâle (2,5 Y 6/2). Humide. Traces d'infiltration humifère. Quelques grosses racines, petites encore assez nombreuses. Pour les cailloux, identique à l'horizon précédent, mais taille plus grande. Nombreuses traînées et taches d'oxydation, assez nombreuses plages réduites (recouvrement : 20 à 25 p. 100 d'oxydation, 5 à 10 p. 100 de réduction). Structure polyédrique subangulaire à angulaire fine, modérément développée. Ferme. Limite graduelle et ondulée.

$(B)_2g$ 33-60 cm — Argile limoneuse, matrice brun jaune (10 YR 5/4), oxydation brun jaune (10 YR 5/8), réduction gris (5 Y 6/1). Humide. Quelques petites racines et radicelles. Nombreux cailloux de taille moyenne. Horizon fortement marqué par les phénomènes d'oxydo-réduction (30 à 35 p. 100 de recouvrement pour chaque). Structure polyédrique subangulaire à angulaire fine à moyenne, bien développée. Quelques revêtements argileux très fins et discontinus s'observent sur les faces verticales de structure. Limite graduelle et légèrement ondulée.

(1) Selon définition de la classification américaine *7th Approximation of Soil Classification*, 1960-1967.

*Profil* : Montmirail 3 — nº 8

*Analyse granulométrique* (p. 100 de terre sèche).

| Nº de labo. | Horizon | Profondeur en cm | Couleur | Argiles 0-2 μ | Limons | | Sables fins | | S.G. 200-2 000 μ | Refus 2 mm | M.O. | pH |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 2-20 μ | 20-50 μ | 50-100 μ | 100-200 μ | | | | |
| 9 247 | $A_1$ | 0- 5 | 10 YR 6/3 | 27,3 | 18,1 | 39,9 | 4,1 | 1,4 | 2,5 | 3,0 | 6,7 | 5,6 |
| 9 248 | $A_3$ | 5- 17 | 10 YR 6/4 | 29,7 | 19,0 | 37,3 | 4,6 | 1,4 | 1,8 | 9,5 | 6,2 | 5,3 |
| 9 249 | $B_1g$ | 17- 33 | 10 YR 5/4 | 33,5 | 19,3 | 37,4 | 3,3 | 1,2 | 2,1 | 11,0 | 2,2 | 5,3 |
| 9 250 | $(B)_2g$ | 33- 60 | 10 YR 5/4 | 44,3 | 20,9 | 29,4 | 3,6 | 0,8 | 1,0 | 25,5 | | 5,8 |
| 9 251 | $B_3g$ | 60- 80 | 7,5 YR 5/6 | 46,3 | 19,3 | 26,9 | 4,9 | 1,2 | 1,4 | 32,0 | | 6,4 |
| 9 252 | $Cg$ | 80-110 | 7,5 YR 5/6 | 49,4 | 15,3 | 22,8 | 6,6 | 2,6 | 3,4 | 41,0 | | 6,2 |

*Caractéristiques physiques.*

| Horizon | *d* app. | *d* abs. | Por. (%) | Agrégats stables (%) | | | log 10 I*s* | Perméabilité log 10 K | | | C.R. pF 2,5 | P.F. pF 4,2 | Eau utile | Limites d'Atterberg | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | alc. | benz. | air | | 1 h | 2 h | 3 h | | | | LL | LP | IP |
| $A_1$ | | | | 29,3 | 14,0 | 16,0 | 1,02 | 1,48 | 1,43 | 1,38 | 37,2 | 27,2 | 10,0 | 51,8 | 30,1 | 21,7 |
| $A_3$ | | | | 35,0 | 18,4 | 19,0 | 0,92 | 1,28 | 1,26 | 1,23 | 37,7 | 17,5 | 20,2 | 52,3 | 26,9 | 25,4 |
| $B_1g$ | | | | 38,4 | 13,0 | 23,8 | 0,97 | 0,89 | 0,83 | 0,80 | 32,3 | 15,9 | 16,4 | 48,0 | 21,9 | 26,1 |
| $(B)_2g$ | 1,53 | 2,53 | 39,5 | 32,8 | 1,6 | 19,4 | 1,31 | 0,95 | 0,95 | 0,93 | 32,5 | 18,8 | 13,7 | 52,5 | 22,4 | 30,1 |
| $B_3g$ | | | | 18,4 | 3,4 | 13,2 | 1,44 | 0,69 | 0,65 | 0,61 | 33,7 | 19,5 | 14,2 | | | |
| $Cg$ | | | | 14,7 | 2,0 | 8,4 | 1,88 | 0,74 | 0,71 | 0,69 | 34,5 | 20,3 | 14,2 | | | |

*Profil* : Montmirail 3-nº 8

*Analyse chimique.*

| Horizon | Carb. | N | C/N | $P_2O_5$ assim. | $K_2O$ éch. | En milliéquivalents p. 100 g, à pH 7,0 | | | | | Fer libre |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (‰) | (‰) | | (‰) | (‰) | C.E. | Ca | Mg | K | Na | $Fe_2O_3$ (%) |
| $A_1$ | 33,4 | 2,75 | 12,2 | 0,05 | 0,35 | 17,7 | 17,4 | 2,24 | 0,73 | 0,09 | 2,4 |
| $A_3$ | 31,2 | 2,54 | 12,3 | — | 0,28 | 19,0 | 17,4 | 1,86 | 0,60 | 0,11 | 2,6 |
| $B_1g$ | 11,2 | 1,10 | 10,2 | — | 0,18 | 18,1 | 16,4 | 1,69 | 0,37 | 0,12 | 3,7 |
| $(B)_2g$ | | | | | 0,17 | 19,4 | 19,0 | 1,73 | 0,37 | 0,15 | 4,3 |
| $B_3g$ | | | | | 0,16 | 19,8 | 20,6 | 1,82 | 0,33 | 0,16 | 5,0 |
| $Cg$ | | | | | 0,16 | 24,5 | 23,8 | 2,91 | 0,33 | 0,22 | 4,6 |

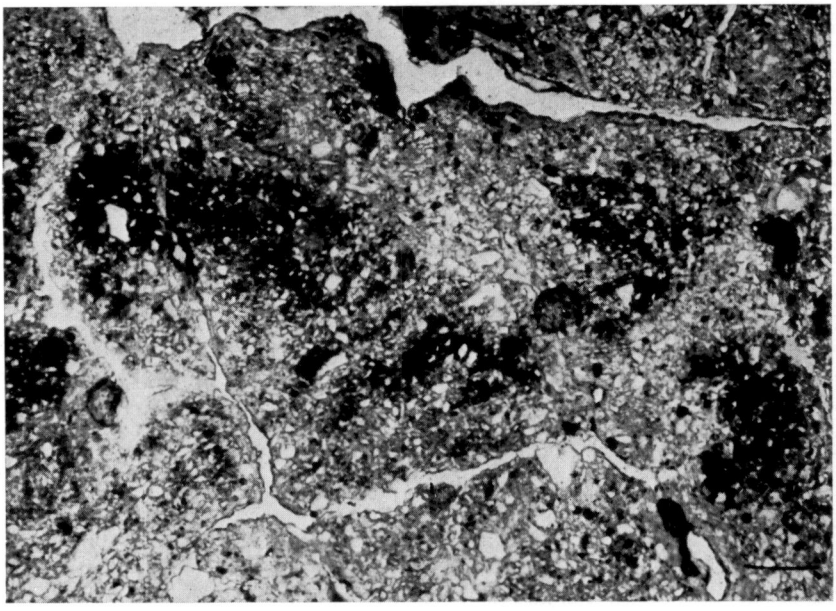
$B_3g$ 60-80 cm — Argile limoneuse à argile lourde, oxydation brun franc (7,5 YR 5/8), réduction gris pâle (2,5 Y 7/1). Très humide. Quelques radicelles. Forte charge en cailloux de toutes tailles. Très forte oxydo-réduction (plus de 40 p. 100 de recouvrement pour chaque). Structure prismatique moyenne assez bien développée, avec sous-structure polyédrique angulaire moyenne, faiblement développée. Très ferme. Limite graduelle et ondulée.

$Cg$ — Argile lourde, mêmes couleurs que précédemment plus quelques taches d'oxydation ocre rouge (5 YR 5/8). Gorgé d'eau. Encore quelques radicelles. Charge en cailloux de plus en plus forte. Intensité des phénomènes d'oxydo-réduction aussi importante que dans le $B_3$. Sans structure discernable. Très ferme.

On note donc l'influence d'un léger apport limoneux en surface, tandis que des phénomènes de lessivage s'observent mais ne peuvent cependant être déduits d'un calcul d'indice d'entraînement.

La teneur en matière organique est importante, le rapport C/N assez élevé : 12.

La structure est stable, dans le cas qui nous occupe, du fait de la teneur importante en matière organique, mais le test de percolation K présente des valeurs faibles.



CLICHÉ 1 — *Sol brun oligotrophe sur argiles à meulière. Horizon (B)g.*

Nombreux nodules ferriques à limites progressives caractérisant les phénomènes d'oxydo-réduction. Assemblage dense à chenaux anastomosés. Quelques revêtements argilo-ferriques. Lumière naturelle. × 70.

La capacité d'échange est relativement faible, 45 méq. pour 100 g d'argile en moyenne.

*Observations micromorphologiques* [1] (cliché 1) :

Le *squelette* est assez homogène, composé essentiellement de quartz et de quelques fragments de meulière, contrairement au *plasma*, argilo-ferrique à ferrique, qui présente de nombreuses ségrégations de fer.

[1] Ces quelques données de micromorphologie concernent essentiellement les horizons (B) des différents sols étudiés. Les termes utilisés correspondent à la terminologie anglo-saxonne de R. BREWER (1964) éventuellement adaptés par LARUELLE (1965).

Quelques références aux travaux de KUBIENA (1938-1953) sont utilisées.

*Les séparations plasmiques* présentes dans le plasma sont essentiellement réparties autour des grains du squelette, ainsi que d'une manière moins importante dans la matrice proprement dite. Quelques-unes d'entre elles sont localisées aux abords de parois des vides, mais d'une manière très irrégulière.

La majorité de ces séparations sont très nettement biréfringentes, et assez fortement orientées.

*L'assemblage plasmique* est donc essentiellement du type squelsepique.

*L'assemblage élémentaire*, assez dense, est du type porphyrique à intertextique.

Les *vides* se présentent sous deux formes principales : soit des chenaux tubulaires très continus, soit des chenaux très fins anastomosés et délimitant des microagrégats. La macroporosité apparaît comme étant assez faible, la microporosité, par contre, demeure très importante.

Les *traits pédologiques* sont constitués par des *concentrations plasmiques*. Ces dernières sont représentées d'une part par quelques *cutans* du type ferri-argillans très fins et discontinus dans la partie supérieure de l'horizon (B), caractérisant une illuviation peu importante, d'autre part par des concentrations ferriques donnant naissance à des *glébules* et « halos glébulaires » liés aux phénomènes d'hydromorphie.

Selon KUBIENA, nous avons donc affaire à un matériau complexe à dominance de plasma du type Braunerde accompagné de Braunlehm Teilplasma et de Braunlehm secondaire « putanique » en moindre proportion.

D'une manière générale, l'importance de la microporosité peut être mise en relation avec une forte rétention pour l'eau, tandis que la faible macroporosité correspond au manque de perméabilité et à l'endohydromorphie marquée de ce type de sol.

Au niveau de l'horizon $A_2$, très mal différencié, on peut localement observer des plages plus claires dues vraisemblablement à l'action cumulée de l'hydromorphie et du lessivage provoquant la mobilisation et le déplacement de plasma argilo-ferrique.

### 3.2. — *Sols argileux lourds développés dans les formations argilo-marneuses de la transition Sannoisien/Bartonien*

Ces sols dessinent des bandes assez larges et grossièrement interrompues sur pente, en bordure des limons de plateau ou des limons caillouteux qui leur font suite quelquefois ; leur superficie est notable sur les cartes de la Haute-Brie.

Les affleurements typiques se trouvent sur pente assez douce, avant les ruptures nettes déterminées par les faciés calcaires plus cohérents du Bartonien.

Ces argiles lourdes sont souvent plus ou moins chargées en calcaire marneux réparti en couches minces au sein de la masse argileuse.

Les sols sont du type *sols bruns calcaires* ou *calciques*, *sols bruns eutrophes* quelquefois. On trouve sporadiquement des sols d'érosion peu évolués lorsque la topographie s'y prête.

Le type de profil est donc A (B) C. Les plus évolués d'entre eux ont un horizon (B) à structure très particulière, en général d'aspect prismatique assez grossier, avec des faces structurales verticales à tendance conchoïdale, et disposées en fuseaux. Les faces de structure présentent des « patines » de glissement (« slickensides » des auteurs anglo-saxons). Ces caractéristiques permettraient de considérer ces sols comme étant en transition vers les « Vertisols », nous les appellerons « *sols bruns vertiques* ».

La classification américaine classe ces sols comme *Eutrochrepts typiques, aquiques, vertiques, rendolliques* quelquefois. Quelques-uns seraient des *Hapludolls*. Les plus typiques d'entre eux constituent vraisemblablement des *Vertisols, des Chromuderts typiques, aquiques* ou *entiques*.

Ils semblent correspondre d'autre part à la définition des « Pélosols » de la classification allemande, l'horizon parfois noté P correspondant au (B) que nous avons décrit : structuration marquée du matériau argileux par rapport au C, sans variation minéralogique importante (MUCKENHAUSEN, 1962-1963).

Les teneurs en matière organique des horizons humifères varient de 2 à 4 p. 100 sous culture, de 8 à 10 p. 100 sous forêt, les rapports C/N moyens correspondants étant de 9 et 11. Il est donc possible d'avoir quelquefois, lorsque la structure est favorable, un épipédon « mollique » très caractéristique. Les taux de saturation en bases sont alors élevés, le complexe étant très largement saturé.

Voici ci-dessous un exemple assez typique :

| | |
|---|---|
| *Localisation* | Carte Montmirail 4, profil nº 18. Est d'Artonges. |
| *Végétation* | Parcelle en labour. |
| *Topographie* | Relief normal, pente légère à exposition sud. Altitude : 180 m. |
| *Économie en eau* | Écoulement superficiel lent. Drainage interne modéré. |
| *Activités biologiques* | Moyennes mais pratiquement limitées à l'A*p*. |
| *Classification* | Sol brun vertique.<br>Eutrochrept vertique/aquique à Chromudert aquique entique.<br>*Série* : SO-3 *bv*. |
| A*p*<br>0-20 cm | Argile lourde brune (10 YR 4/3). Frais. Teneur assez importante en matière organique. Racines peu nombreuses. Quelques rares débris de meulière. Structure grumeleuse très fine, bien développée autour des racines, puis polyédrique angulaire fine bien développée ailleurs. Assez friable. Limite distincte et légèrement ondulée. |
| $A_3$<br>20-35 cm | Argile lourde brun-jaune foncé (10 YR 4/4). Frais. Teneur plus faible en matière organique (infiltrations). Racines peu nombreuses, en diminution notable. Structure polyédrique subangulaire moyenne, modérément développée. Ferme. Limite distincte et irrégulière. |
| (B) *vg*<br>35-80 cm | Argile lourde jaune pâle (5 Y 8/3). Présence de quelques plages rouilles d'oxydation. Frais. Effervescence variable à l'HCl, faible pour les zones d'argile verte, très forte pour les bandes marneuses. Quelques radicelles. Quelques petits cailloux calcaires tendres et arrondis dans les plages de marne. Structure de type polyédrique angulaire grossière avec faces conchoïdales par endroits, correspondant à des faces de glissement présentant de nombreuses patines. Ces faces caractéristiques sont plus ou moins fortement inclinées par rapport à un plan vertical. Limite graduelle et régulière. |
| $C_1g$<br>80-115 cm | Marne gris pâle (5 Y 7/2). Taches d'oxydo-réduction. Frais. Structure polyédrique angulaire grossière avec faces moins définies que pour l'horizon précédent. Limite graduelle et régulière. |
| $C_2$<br>115-140 cm | Marne gris pâle (5 Y 7/2). Frais. Structure polyédrique angulaire grossière faiblement développée. |

Nous pouvons considérer la granulométrie du solum comme assez uniforme, le calcaire étant abondant dans les horizons inférieurs, particulièrement sous forme très fine.

La teneur en matière organique est moyenne, le C/N bas : 8,8.

La porosité est très importante et la stabilité de structure est bonne. Le test Is est à confronter aux valeurs de K qui sont très faibles et caractérisent très nettement l'endohydromorphie assez marquée (faible perméabilité de ces formations).

La capacité d'échange est assez importante : plus de 60 méq. p. 100 g d'argile.

Le calcaire actif représente 40 à 50 p. 100 du calcaire total.

Dans la classification américaine, ce sol serait un « Eutrochrept » sous-groupe « aquique » ou « vertique ». Il constitue cependant un « intergrade » très proche des Vertisols.

Pour passer avec certitude dans l'ordre des Vertisols, il faudrait une structure plus grossière dans l'horizon $A_3$, (de façon à dissocier des fentes de retrait plus nettes), et une capacité d'échange légèrement plus élevée (plus de 30 méq. p. 100 g de sol).

*Profil* : Montmirail 4 — nº 18

*Analyse granulométrique* (p. 100 de terre sèche).

| Nº de labo. | Horizon | Profondeur | Couleur | Argiles | Limons | | Sables fins | | S. G. | Refus | M. O. | Calc. | pH |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 0-2μ | 2-20 μ | 20-50 μ | 50-100μ | 100-200 μ | 200-2000 μ | 2 mm | | | |
| 9318 | A*p* | 0-20 | 10 YR 6/2 | 46,4 | 16,3 | 22,7 | 1,8 | 1,7 | 3,4 | 0.0 | 3,7 | 4,0 | 7,4 |
| 9319 | $A_3$ | 20-35 | 10 YR 6/3 | 49,3 | 13,9 | 24,0 | 1,8 | 1,6 | 4,6 | | 1,8 | 3,0 | 7,5 |
| 9320 | (B)*vg* | 35-80 | 5 Y 7/3 | 41,8 | 12,7 | 13,0 | 0,2 | 0,6 | 0,4 | | 0,7 | 30,6 | 7,4 |
| 9321 | $C_1g$ | 80-115 | 5 Y 8/2 | 52,1 | 14,7 | 12,8 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | | | 19,8 | 7,8 |
| 9322 | $C_2$ | 115-140 | 5 Y 8/2 | 47,0 | 8,5 | 12,2 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | | | 31,8 | 7,9 |
| 9320 (1) | (B)v*g* | 35-80 | | 60,0 | 30,1 | 3,7 | 1,4 | 0,8 | 4,0 | | | | |
| 9321 (1) | $C_1g$ | 80-115 | | 67,4 | 19,5 | 5,6 | 1,2 | 0,9 | 5,4 | | | | |
| 9322 (1) | $C_2$ | 115-140 | | 74,1 | 21.8 | 1,6 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | | | | |

(1) Analyse sans destruction du calcaire.

*Caractéristiques physiques.*

| Horizons | *d* app. | *d* abs. | Por. (%) | Agrégats stables | | | Log 10 Is | Perméabilité log 10 K | | | C. R. pF 2,5 | P.F. pF 4,2 | Eau utile | Limites d'Atterberg | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | alc. | benz. | air | | 1 h | 2 h | 3 h | | | | LL | LP | IP |
| A*p* | 1,19 | 2,48 | 52,1 | 51,1 | 6,4 | 40,0 | 0,90 | 1,33 | 1,28 | 1,19 | 36,7 | 21,8 | 14,9 | 49,3 | 26,5 | 22,8 |
| $A_3$ | | | | 49,9 | 5,0 | 42,6 | 1,06 | 1,32 | 1,25 | 1,16 | 41,8 | 24,6 | 17,2 | 60,5 | 24,5 | 36,0 |
| (B)*vg* | 1,24 | 2,50 | 50,4 | 53,4 | 5,8 | 37,7 | 1,16 | 0,83 | 0,80 | 0,73 | 38,3 | 20,6 | 17,7 | 64,1 | 22,9 | 41,2 |
| $C_1g$ | | | | 52,5 | 6,6 | 31,2 | 1,24 | 0,60 | 0,41 | 0,40 | 46,1 | 25,4 | 20,7 | | | |
| $C_2$ | | | | | | | | | | | 47,6 | 27,8 | 19,8 | | | |

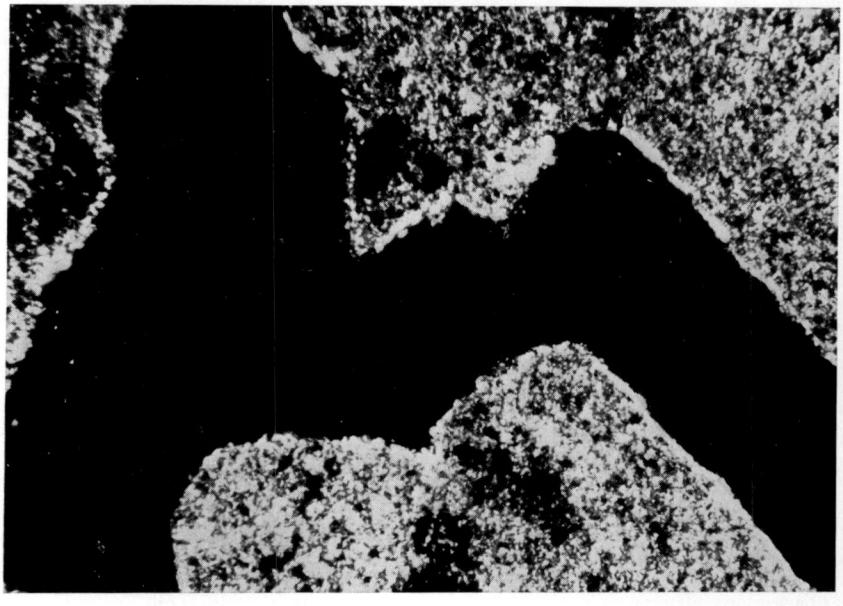
*Profil :* Montmirail 4 — nº 18

*Analyse chimique.*

| Horizon | Carb. (‰) | N (‰) | C/N | $P_2O_5$ ass. (‰) | $K_2O$ éch. (‰) | En milliéquivalents p. 100 g., à pH 7,0 | | | | | Fer libre | Calc. actif (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | C.E. | Ca | Mg | K | Na | $Fe_2O_3$ (%) | |
| A*p* | 18,8 | 2,13 | 8,8 | 0,11 | 0,42 | 27,05 | Sat | 1,35 | 0,89 | 0,31 | 1,38 | |
| $A_3$ | 9,2 | 1,05 | 8,8 | | 0,44 | 27,60 | Sat | 1,14 | 0,93 | 0,35 | 1,52 | |
| (B)*vg* | 3,7 | 0,54 | 6,8 | | 0,31 | 25,90 | Sat | 1,31 | 0,67 | 0,33 | 2,08 | 11,5 |
| $C_1g$ | | | | | 0,38 | 31,10 | Sat | 1,60 | 0,81 | 0,45 | 2,41 | 7,8 |
| $C_2$ | | | | | | | | | | | | 15,8 |

*Observations micromorphologiques* (clichés 2 et 3) :

Le *squelette* est homogène ; le *plasma*, argilo-ferrique, est essentiellement hétérogène ; sa caractéristique essentielle réside en des striations ou taches sombres non biréfringentes, distribuées dans l'ensemble de la masse plasmique.



CLICHÉ 2 — *Sol brun calcaire à caractères vertiques sur argile lourde du Bartonien supérieur Horizon (B)vg.*

Limites d'agrégats. L'assemblage présente en surface une organisation particulière, à plasma fortement orienté, correspondant aux faces de glissement. On discerne les zones plasmiques sombres dans le fond matriciel. Lumière polarisée. × 70.

Les *séparations* sont de plusieurs types, assez nombreuses mais généralement modérément à faiblement orientées. Elles s'observent d'une part réparties dans la matrice, soit distribuées au hasard, soit avec une direction d'allongement privilégiée, d'autre part entourant les grains du squelette.

De petits lisérés particuliers, très biréfringents, s'observent en bordure des agrégats ; ils semblent issus d'un simple réarrangement périphérique, aucune discontinuité marquée n'apparaissant avec la matrice elle-même.

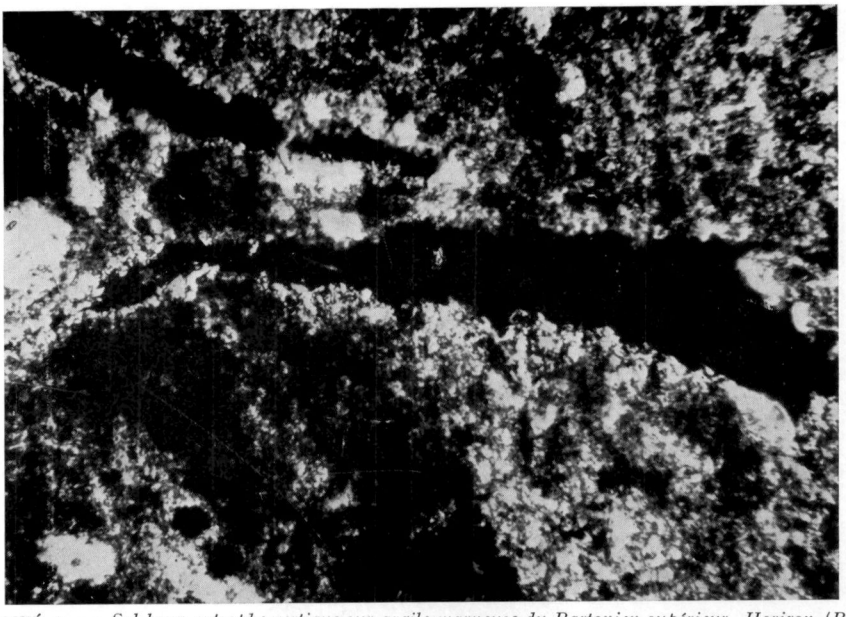
Il faut remarquer que les structures plasmiques sombres mentionnées plus haut, et réparties au sein des séparations, ont une morphologie étroitement liée au type dans lequel elles se présentent : allongées dans les séparations « masépiques », plus regroupées dans les autres types.

D'une manière générale, le degré d'orientation relativement peu marqué de la plus grande partie du plasma pourrait être mis en relation avec la tendance vertique de ce matériau.

*L'assemblage plasmique* peut être qualifié de omnisepique associé à squelsepique, masepique et mosepique localement. Le type masepique apparaît comme très dense lorsque situé en bordure des agrégats, mais beaucoup plus lâche lorsque situé à l'écart des surfaces naturelles.

*L'assemblage élémentaire* est d'une manière prépondérante du type porphyrique typique; très localement, il passe au type intertextique là où un squelette de limon fin, assez étroitement aggloméré, est relié par des ponts plasmiques.

Il semble donc que des contraintes mécaniques provoquent localement des sélections et concentrations relatives de certains constituants du matériau : « self-mulching » limité en quelque sorte.



CLICHÉ 3. — *Sol brun eutrophe vertique sur argile marneuse du Bartonien supérieur. Horizon (B)v.*

Aspect des fentes désordonnées (« craze planes ») caractéristiques de ce type de sol. Remarquer l'hétérogénéité du plasma, à orientation très variable. Lumière polarisée. × 70.

La *structure de base* est donc assez dense, les *vides* apparaissant le plus souvent soit comme des chenaux plus ou moins aplatis et assez régulièrement anastomosés, soit sous forme de fentes désordonnées.

On observe aux forts grossissements de très fins canalicules qui indiquent une porosité capillaire très importante ; il est intéressant de rappeler que la densité apparente des agrégats est dans le cas qui nous occupe relativement faible.

En ce qui concerne les *traits pédologiques*, les *concentrations plasmiques* du type cutans sont pratiquement absentes, à l'exception de quelques formations apparentées aux « stress cutans » selon BREWER, et dues aux forces de frottement internes. Par contre, les concentrations de fer sont assez nombreuses et se présentent sous forme de *glébules* très organisés, en relation avec l'hydromorphie du matériau.

Dans la nomenclature de KUBIENA, nous sommes ici en présence d'un matériau du type Braunerde, mais à fraction très importante de Braunlehm-Teilplasma.

Remarquons que l'ensemble des caractéristiques micromorphologiques observées distingue fort nettement ce type de sol des autres formations argileuses étudiées. Le facteur dominant l'organisation des constituants est la grande plasticité du matériau.

### 3.3. — *Sols argileux développés dans des formations ludiennes du calcaire de Champigny*

Ces formations présentent généralement une décarbonatation assez importante, parfois totale en surface.

Le développement de profil est du type A (B) C.

L'aspect général en est le suivant :

la couleur de l'horizon humifère est plus ou moins foncée suivant que l'on se trouve sous bois ou sous culture (variant de 10 YR 3/2 à 10 YR 4/3 : brun gris foncé à brun foncé), la teneur en matière organique passant de 7 à 10 p. 100 sous forêt à 2,5-4 p. 100 sous culture. Le rapport C/N est voisin de 9,5 sous culture mais peut atteindre 12 sous bois, le pH varie de 7,5 à 8,5.

*Profil* : Montmirail 3 — n° 1

*Analyse granulométrique* (p. 100 de terre sèche).

| N° de labo. | Horizon | Profondeur en cm | Couleur | Argiles | Limons | | Sables fins | | S. G. | Refus | M. O. | Calc. | pH |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 0-2 µ | 2-20 µ | 20-50 µ | 50-100 µ | 100-200 µ | 200-2000 µ | 2 mm | | | |
| 9215 | $A_{11}$ | 0-9 | 10 YR 5/2 | 48,9 | 19,7 | 8,6 | 1,3 | 1,1 | 2,9 | 3,8 | 10,8 | 6,7 | 7,4 |
| 9216 | $A_{12}$ | 9-25 | 10 YR 6/3 | 44,1 | 12,7 | 16,9 | 2,2 | 1,9 | 3,6 | 26,0 | 2,9 | 15,7 | 7,8 |
| 9217 | (B) | 25-50 | 10 YR 5/3 | 50,0 | 7,7 | 10,4 | 0,3 | 0,2 | 0,4 | 17,0 | 1,9 | 29,1 | 7,8 |
| 9218 | C | + 50 | 10 YR 5/3 | 67,0 | 1,7 | 8,2 | 0,5 | 0,3 | 1,0 | 15,0 | | 21,3 | 7,7 |
| 9216 (1) | $A_{12}$ | 9-25 | | 49,6 | 14,2 | 17,4 | 3,6 | 2,5 | 9,8 | 26,0 | | | |
| 9217 (1) | (B) | 25-50 | | 64,9 | 9,9 | 4,2 | 2,5 | 1,5 | 17,0 | 17,0 | | | |
| 9218 (1) | C | + 50 | | 72,8 | 6,5 | 1,4 | 1,4 | 0,9 | 17,0 | 15,0 | | | |

(1) Analyse sans destruction du calcaire.

*Caractéristiques physiques.*

| Horizon | *d* app. | *d* abs. | Por. (%) | Agrégats stables | | | log 10 *Is* | Perméabilité log 10 K | | | C.R. pF 2,5 | P.F. pF 4,2 | Eau utile | Limites d'Atterberg | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | alc. | benz. | air | | 1 h | 2 h | 3 h | | | | LL | LP | IP |
| $A_{11}$ | | | | 71,3 | 56,5 | 54,1 | 0,33 | 1,98 | 1,78 | 1,67 | 49,3 | 36,1 | 13,2 | 85,6 | 45,2 | 40,4 |
| $A_{12}$ | | | | 65,5 | 26,2 | 49,9 | 0,80 | 1,64 | 1,52 | 1,46 | 38,6 | 27,0 | 11,6 | 61,1 | 26,3 | 34,8 |
| (B) | 1,20 | 2,40 | 49,2 | 55,8 | 27,3 | 48,2 | 1,02 | 1,68 | 1,56 | 1,52 | 43,5 | 27,9 | 15,6 | 71,7 | 32,7 | 39,0 |
| C | | | | 54,8 | 31,4 | 44,2 | 0,98 | 1,55 | 1,45 | 1,41 | 50,4 | 32,8 | 17,6 | | | |

*Profil* : Montmirail 3 — nº 1

*Analyse chimique.*

| Horizon | Carb. | N | C/N | $P_2O_5$ ass. | $K_2O$ éch. | En milliéquivalents p. 100 g. à pH 7,0 | | | | | Fer libre | Calc. actif |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (‰) | (‰) | | (‰) | (‰) | C.E. | Ca | Mg | K | Na | $Fe_2O_3$ (%) | (%) |
| $A_{11}$ | 54,0 | 4,71 | 11,5 | 0,04 | 0,52 | 34,9 | Sat | 2,35 | 1,11 | 0,31 | 1,45 | |
| $A_{12}$ | 14,5 | 1,49 | 9,7 | — | 0,37 | 25,8 | Sat | 1,93 | 0,79 | 0,23 | 1,61 | 4,8 |
| (B) | 9,4 | 1,07 | 8,8 | — | 0,38 | 32,5 | Sat | 2,17 | 0,81 | 0,24 | 2,28 | 7,0 |
| C | | | | | 0,46 | 35,8 | Sat | 2,48 | 0,98 | 0,27 | 2,24 | 6,3 |

La structure est assez souvent grumeleuse dans la partie supérieure de l'horizon $A_1$, correspondant à une forte colonisation radiculaire, puis polyédrique angulaire très fortement développée dans l'horizon (B), où quelques caractères « vertiques » sont généralement observables.

Le drainage interne est généralement très favorable.

Ces sols constituent essentiellement des *rendzines brunifiées* et des *sols bruns calcaires*, quelquefois des *sols bruns entrophes* ou le plus souvent *calciques*, fréquemment assez superficiels.

La 7e Approximation américaine classe ces sols comme *Eutrochrepts typiques* ou *rendolliques*. Certains constituent cependant des *Mollisols* assez bien caractérisés, des *Hapludolls*.

Nous donnons ci-dessous la description d'un profil assez caractéristique :

| | |
|---|---|
| *Localisation* | Carte Montmirail 3 A, profil nº 1. Proximité Montfaucon. |
| *Végétation* | Taillis calcicole. Chênes pédonculés, coudriers, troènes. |
| *Topographie* | Relief ondulé, pente moyenne à exposition ouest. Altitude : 170 m. |
| *Économie en eau* | Écoulement superficiel modéré à rapide.<br>Drainage interne favorable. |
| *Activités biologiques* | Bonnes dans l'$A_{11}$ et l'$A_{12}$, moyennes ensuite. |
| *Pierrosité* | Moyenne. |
| *Érosion* | Moyenne. |
| *Classification* | Sol brun calcaire. Eutrochrept typique.<br>Série : KO*c*-1*bc*. |
| $O_1$ | Très faible. |
| $A_{11}$<br>0-8/12 cm | Argile lourde gris très foncé (10 YR 3/1 vers 3/2). Frais. Teneur importante en matière organique. Très nombreuses petites racines à la partie supérieure de l'horizon, moins importantes à la partie inférieure. Charge peu importante en cailloux et petits fragments calcaires. Structure grumeleuse fine bien développée à la partie supérieure. Tendance vers une structure polyédrique subangulaire fine bien développée à la partie inférieure de l'horizon. Friable à ferme. Limite distincte et ondulée. |
| $A_{12}$<br>8/12-25 cm | Argile limoneuse brune (10 YR 4/3). Frais. Infiltration humifère encore importante. Faible colonisation radiculaire. Assez nombreux cailloux calcaires, plus quelques nodules. Structure polyédrique angulaire à subangulaire fine à moyenne, modérément développée. Ferme. Limite graduelle et régulière. |
| (B)<br>25-50 cm | Argile lourde brun-jaune (10 YR 5/6). Frais. Quelques petites racines. Charge moyenne en cailloux plus quelques nodules. Structure polyédrique angulaire fine bien développée. Ferme. Rares revêtements argilo-humifères fins sur les faces structurales, de couleur brune (10 YR 4/3). Quelques patines de glissement s'observent localement sur les faces des agrégats, sans intersection nette. Limite graduelle et régulière. |
| C et R<br>+ 50 cm | Argile lourde calcaire brun jaune (10 YR 5/6 vers 5/8). Frais à humide. Charge en cailloux et petites fragments calcaires identique à l'horizon sus-jacent. Structure polyédrique angulaire moyenne, faiblement développée. Très ferme. On passe progressivement au niveau du Travertin représenté par de gros blocs à angles arrondis, les interstices étant remplis de matériau C. |

La répartition du calcaire semble particulière : une quantité assez importante se présente dans la fraction la plus grossière, supérieure à 200 microns et constitue vraisemblablement des agrégats, en cimentant des particules siliceuses plus fines.

La teneur en matière organique est importante, le rapport C/N relativement élevé : 11,5.

La structure est particulièrement stable, le matériau présentant d'autre part une perméabilité excellente, mise en évidence par les résultats du test de percolation.

La capacité d'échange est élevée : 65 méq. pour 100 g d'argile dans l'horizon (B), là où apparaissent les quelques faces de glissement.

Le calcaire actif représente 25 à 30 p. 100 du calcaire total.

La présence de quelques revêtements argilo-humifères enrobant des agrégats à la partie supérieure du (B) semble indiquer une tendance à un lessivage léger.

L'horizon de surface présente beaucoup de caractères d'un horizon « mollique », la couleur de l'$A_{12}$ étant cependant trop claire.

Ce sol est cependant en transition vers les Mollisols.

*Observations micromorphologiques*

Le *squelette* est ici assez hétérogène : quartz de différentes dimensions, quelques fragments de calcaires, petits et corrodés.

Le *plasma* est assez homogène, des ségrégations plus colorées et plus orientées se répartissent par plages relativement vastes ; la nature en est argileuse à argilo-ferrique. Des fragments de matière organique sont présents.

Des *séparations plasmiques* entourent très nettement la majorité des grains du squelette, d'autres de petites tailles se différencient au sein du plasma.

On observe, avec une intensité cependant beaucoup moindre, la présence de petites taches et de quelques striations analogues à celles mises en évidence dans les argiles marneuses, et localisées dans des séparations faiblement orientées.

Notons d'autre part, que certains réarrangements du fond matriciel s'observent ici également en bordure des micro-agrégats.

Les *assemblages plasmiques* sont surtout du type squelsepique, mais également masepique, insepique et mosepique.

*L'assemblage élémentaire* est du type porphyrique assez caractéristique.

La microstructuration est assez forte, la *structure de base* montre essentiellement des chenaux interagrégats et des faces de dissociation nombreuses (« Metacraze planes » — BREWER), associés à des vides et chambres aux parois émoussées.

Les *traits pédologiques* comprennent essentiellement des concentrations se présentant sous forme de *nodules* très ferriques, non biréfringents, à limites très nettes. La formation de ces concentrations pourrait correspondre à des processus plus anciens, contemporains de conditions de décarbonatation plus intenses que celles régnant actuellement.

Quelques rares *argillans* fins, discontinus et faiblement orientés peuvent s'observer dans la partie supérieure des horizons B de certains de ces sols, parmi les plus décarbonatés.

Quelques lithoreliques sont présentes sous la forme de fragments calcaires.

Dans la nomenclature de KUBIENA, la structure élémentaire serait du type « porphyropectic. » Il s'agit d'une Braunerde typique, accompagné de Braunlehm-Teilplasma en quantité moyenne.

Le matériau qui nous occupe semble donc présenter un certain dynamisme interne défini sur le plan micromorphologique par des caractéristiques analogues à celles décrites pour les argiles marneuses, mais d'une intensité moindre. Il nous paraît logique de faire le rapprochement avec les quelques faces de glissement observées sur le profil en place lors de l'examen macromorphologique.

### 3.4. — *Sols argileux développés sur formations du Marinésien*

Nous avons affaire ici à toutes les formations argileuses d'altération des assises marno-calcaires de Saint-Ouen.

Ce sont des sols à développement de profil A (B) C.

L'horizon humifère très sombre, à structure fréquemment grumeleuse contient une quantité de matière organique variable mais assez élevée, le complexe est saturé par le calcium ; il s'agit d'un « épipédon mollique » très typique.

Dans ces sols où un horizon (B) se différencie assez nettement, on observe une structure polyédrique le plus souvent angulaire dont le degré de développement et la qualité dépendent de la texture du matériau, argile limoneuse plus ou moins lourde, ou argile. Certains caractères « vertiques », faces de glissement, ne sont pas rares, particulièrement dans les types les plus lourds.

Le substrat calcaire se trouve à faible profondeur le plus souvent, la teneur du matériau en $CaCO_3$ est forte ainsi que la charge en cailloux, excepté sur substrat marneux.

La capacité d'échange et le taux de saturation en bases sont élevés, la stabilité structurale est bonne à moyenne.

Les dépôts calcarifères du Marinésien présentent fréquemment des couches ou plages marneuses de couleurs variées, le plus souvent gris blanchâtre à gris verdâtre, plus ou moins argileuses et fréquemment regroupés sous l'appellation « calcaires marneux ».

Cette variété de faciès au sein d'un profil provoque des variations structurales indépendantes du développement, et influe localement sur l'économie en eau de ces sols.

Il s'agit essentiellement de *rendzines brunifiées* et de *sols bruns calcaires*, des *Hapludolls typiques* ou *lithiques*, de la classification américaine ou encore d'*Eutrochrepts rendolliques*.

Certains d'entre eux cependant constituent des *rendzines typiques*, *Rendolls typiques* ou *eutrochreptiques*, ou encore *Hapludolls entiques*.

Situés sur des pentes moyennes à fortes, ces sols sont sujets à l'érosion. Le drainage de la majorité d'entre eux est favorable.

Le profil décrit ci-dessous caractérise ce type de sols.

| | |
|---|---|
| *Localisation* | Carte Montmirail 3, profil n° 5 — Sud-est Marchais-en-Brie. |
| *Végétation* | Taillis sous futaie à réserve de chênes. Taillis : coudriers, quelques pins noirs, charmes, érables champêtres, ormes champêtres, présence de quelques châtaigniers. |
| *Topographie* | Relief ondulé. Pente moyenne, assez longue, à exposition sud-ouest. Altitude : 170 m. |
| *Économie en eau* | Écoulement superficiel rapide. Drainage interne favorable. |
| *Activités biologiques* | Bonnes dans l'$A_{11}$ et l'$A_{12}$, assez bonnes dans le (B). |
| *Pierrosité* | Modérément importante dans tout le profil. |
| *Classification* | Rendzine brunifiée. Hapludoll typique/lithique.<br>*Série* : KO-1*rb*. |
| $O_1$<br>1,5-0 cm | Couche L moyenne. |
| $O_2$ | Couche F pratiquement nulle. |
| $A_{11}$<br>0-10/12 cm | Argile lourde brun gris très foncé (10 YR 3/2). Frais. Teneur importante en matière organique. Grosses racines peu importantes. Petites racines plus nombreuses. Charge en cailloux calcaires peu importante. Structure grumeleuse fine autour des racines et polyédrique angulaire fine modérément développée. Assez ferme. Limite distincte et ondulée. |
| $A_{12}$<br>10/12-18/20 cm | Argile lourde brune (10 YR 3,5/3). Frais. Teneur assez importante en matière organique. Grosses racines plus nombreuses. Petites racines bien représentées. Charge en cailloux calcaires assez importante. Quelques nodules calcaires. Structure polyédrique angulaire à subangulaire fine, faiblement développée. Assez ferme. Limite distincte et ondulée. |
| (B)<br>18/20-40/45 cm | Argile limoneuse brun clair (10 YR 4,5 /3). Frais. Infiltration humifère encore importante. Quelques grosses racines. Colonisation radicellaire peu importante. Charge en cailloux calcaires identique à l'horizon susjacent. Nombreux petits fragments calcaires. Structure polyédrique angulaire fine, modérément développée. Assez ferme. Limite graduelle et fortement ondulée. |
| C<br>+ 40/45 cm | Roche calcaire en cours d'altération. Assez frais. Quelques grosses et petites racines localement. Nombreux cailloux et nodules calcaires. |

*Profil :* Montmirial 3 — nº 5

*Analyse granulométrique* (p. 100 de terre sèche).

| Nº de labo. | Horizon | Profondeur en cm | Couleur | Argiles | Limons | | Sables fins | | S.G. | Refus | M.O. | Calc. | pH |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 0-2 µ | 2-20 µ | 20-50 µ | 50-100µ | 100-200 µ | 200-2 000 µ | 2 mn | | | |
| 9228 | $A_{11}$ | 0-11 | 10 YR 4/3 | 54,0 | 12,3 | 18,0 | 1,0 | 1,1 | 1,9 | 2,7 | 11,7 | 1,0 | 7,1 |
| 9229 | $A_{12}$ | 11-19 | 10 YR 5/1 | 50,1 | 11,2 | 15,0 | 1,0 | 1,0 | 3,0 | 18,2 | 4,9 | 13,8 | 7,5 |
| 9230 | (B) | 19-42 | 10 YR 6/1 | 40,7 | 8,5 | 6,1 | 0,4 | 0,5 | 2,3 | 19,6 | 2,7 | 28,8 | 7,6 |
| 9231 | C | + 45 | 10 YR 8/2 | 19,1 | 0,0 | 8,9 | 1,2 | 0,8 | 2,1 | 25,2 | — | 67,9 | 7,9 |
| 9229 (1) | $A_{12}$ | 11-19 | | 54,0 | 10,2 | 13,6 | 1,7 | 1,9 | 13,7 | | | | |
| 9230 (1) | (B) | 19-42 | | 46,2 | 11,7 | 9,8 | 2,0 | 2,7 | 24,9 | | | | |
| 9231 (1) | C | + 45 | | 43,4 | 23,4 | 0,0 | 3,9 | 3,7 | 25,6 | | | | |

(1) Analyse sans distinction du calcaire.

*Caractéristiques physiques.*

| Horizon | *d* app. | *d* abs. | Por. (%) | Agrégats stables (%) | | | log 10 Is | Perméabilité log 10 K | | | C.R. pF 2,5 | P.F. pF 4,2 | Eau utile | Limites d'Atterberg | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | alc. | benz. | air | | 1 h | 2 h | 3 h | | | | LL | LP | IP |
| $A_{11}$ | | | | 71,0 | 53,3 | 61,4 | 0,27 | 1,92 | 1,79 | 1,75 | 59,1 | 38,8 | 20,3 | 97,5 | 48,9 | 48,5 |
| $A_{12}$ | | | | 59,0 | 42,1 | 57,2 | 0,60 | 1,04 | 1,01 | 0,97 | 50,2 | 28,7 | 21,5 | 80,1 | 41,0 | 39,1 |
| (B) | 0,8 | 2,3 | 65,7 | 68,8 | 41,3 | 62,0 | 0,65 | 1,36 | 1,30 | 1,26 | 41,2 | 22,6 | 18,6 | 70,6 | 35,4 | 35,2 |
| C | | | | 66,7 | 29,8 | 57,7 | 1,00 | 0,61 | 0,50 | 0,48 | 33,7 | 15,4 | 18,3 | | | |

*Profil* : Montmirail 3 — n° 5.

*Analyse chimique.*

| Horizon | Carb. (‰) | N (‰) | C/N | $P_2O_5$ ass. ‰ | $K_2O$ éch. ‰ | En milliéquivalents p. 100 g. à pH 7,0 C.E. | Ca | Mg | K | Na | Fer libre $Fe_2O_3$ (%) | Cal. actif (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $A_{11}$ | 58,8 | 4,7 | 12,6 | 0,05 | 0,61 | 45,7 | Sat | 1,91 | 1,29 | 0,27 | 1,35 | |
| $A_{12}$ | 24,6 | 2,1 | 11,5 | — | 0,33 | 37,0 | Sat | 2,74 | 0,71 | 0,28 | 1,40 | 4,8 |
| (B) | 13,7 | 1,4 | 9,9 | — | 0,21 | 27,3 | Sat | 2,04 | 0,35 | 0,21 | 0,86 | 13,8 |
| C | | | | | 0,14 | 15,5 | Sat | 1,42 | 0,30 | 0,16 | 0,37 | 17,0 |

La répartition granulométrique en fonction de la profondeur est très caractéristique d'un matériau issu de l'altération en place de formations calcaires, la teneur en argile diminuant progressivement avec augmentation notable du $CaCO_3$.

La répartition granulométrique de ce calcaire paraît assez régulière.

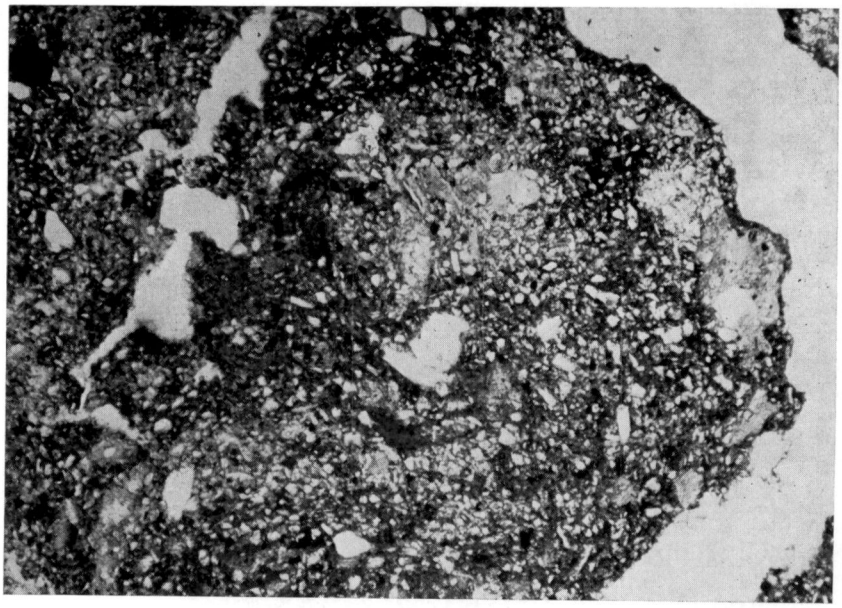
La teneur en matière organique est très importante, le rapport C/N est relativement élevé.

La structure présente une bonne stabilité sur l'ensemble du solum, mais la valeur de K, bonne à moyenne en surface, diminue ensuite pour atteindre 0,6, ce qui est très bas.

La capacité d'échange est élevée, près de 70 méq. pour 100 g d'argile.

En ce qui concerne la classification américaine, la profondeur de l'horizon mollique et la teneur importante en calcaire de l'horizon (B) cambique, font que ce sol est en transition entre le « Hapludoll typique » indiqué et un « Rendoll eutrochreptique ».

*Observations micromorphologiques* (cliché 4) :



CLICHÉ 4. — *Sol brun calcaire sur formations du Marinésien. Horizon (B).*

Agrégat bien différencié, poreux, présentant de nombreux fragments de calcaire. Plasma argilo-ferrique. Lumière naturelle. × 70.

Le *squelette* est ici très hétérogène et constitué de fragments de quartz et de calcaire de taille variée.

Le *plasma* est assez homogène, quelques ségrégations ferriques plus colorées se distinguent cependant dans la masse. La nature est argileuse à argilo-ferrique.

Les *séparations* sont très fines et entourent surtout les grains du squelette, quelques-unes se distinguent au sein de la matrice, ou réparties de manière subcutanique aux abords des parois des vides.

L'*assemblage plasmique* est donc essentiellement squelsepique, avec insepique, masepique et vosepique associés.

L'*assemblage élémentaire* correspond au type porphyrique typique.

Les *vides* sont relativement nombreux et de formes variées : cavités, chambres et chenaux à parois toujours très adoucies.

Les *traits pédologiques* comportent essentiellement, en plus des séparations plasmiques, des *concentrations ferriques* noduleuses très sombres, parfois opaques, à limites très nettes, comme celles décrites dans le type de sol précédent. Ces nodules sont accompagnés de quelques cristallites et amas ferriques fortement colorés et biréfringents.

Le calcaire est également présent sous forme de « calcitans » tapissant ou colmatant certains vides, ou sous celle de nodules.

Selon KUBIENA, la structure élémentaire est, comme pour le cas précédent, du type « porphyropectic ». Nous avons d'autre part affaire au Braunerde le plus typique parmi ceux que nous avons étudiés dans cette note. Le Braunlehm, Teilplasma y est présent en quantité limitée.

Il semble y avoir très peu de fractions plasmiques mobiles dans ce type de sol, ce qui correspond fort bien aux définitions macromorphologiques retenues par ailleurs.

### 3.5. — *Comparaison des caractéristiques de ces sols*

Quatre unités de sols lourds viennent d'être décrites et il apparaît à côté de caractères communs à tous ces sols argileux, de nombreuses différences tant sur le plan physico-chimique que physique et mécanique. Le tableau récapitulatif présenté en fin de chapitre, donnant quelques moyennes caractéristiques calculées sur un nombre important d'horizons (B) de profils prélevés en cours de cartographie permet la mise en évidence des données essentiellement liées aux différents matériaux. Ces divers aspects ont pour conséquence des propriétés différenciées en ce qui concerne la genèse, la classification et l'utilisation agronomique de ces sols.

#### 3.51. *Genèse et classification.*

Toutes ces formations superficielles constituent des sols relativement âgés et dont le degré d'évolution actuel est caractérisé par la présence d'un horizon pédogénétique à structuration généralement fortement marquée.

Tous possèdent donc un horizon (B) structural, correspondant au B « cambique » de la classification américaine. En outre, cet horizon présente fréquemment des faces de glissement ou caractères « vertiques » dans les plus saturés d'entre eux.

Certains phénomènes d'illuviation s'observent par ailleurs dans les sols les plus désaturés, ce processus étant souvent favorisé par une influence lœssique dans la partie supérieure du dépôt.

Les horizons de surface sont très bien structurés dans les matériaux d'altération des calcaires et constituent lorsque les conditions sont favorables, de véritables horizons « molliques ».

Du point de vue classification, ils font partie soit de la classe des sols évolués à humus doux, ou sols brunifiés, soit de celle des sols calcimagnésiques. Un aspect important est donc la présence assez fréquente de patines de glissement ou « slickensides », permettant d'envisager pour certains sols l'appartenance à un sous-groupe ou à un faciès « vertique ». Ce caractère devient parfois presque diagnostique dans des matériaux argilo-marneux qu'il conviendrait peut-être alors de considérer comme des Vertisols lithomorphes.

Dans la 7$^{e}$ Approximation de classification américaine des sols, nous avons affaire soit à des Inceptisols, soit à des Mollisols, avec transition vers l'ordre des Vertisols.

On ne trouve nulle part un degré de lessivage suffisant pour différencier un horizon argillique, quelques sols pouvant cependant être considérés comme intergrade vers les Alfisols.

3.52. *Micromorphologie.*

Si l'on essaye de mettre les caractères propres aux sols argileux de la Haute-Brie en évidence, on peut admettre ce qui suit.

La nature et l'organisation du *squelette* correspondent très directement aux caractères du matériau originel.

Le *plasma*, quant à lui, apparaît comme assez hétérogène dans les matériaux sédimentaires et l'argile à meulière, beaucoup plus homogène dans les matériaux d'altération des formations calcaires.

Les *séparations plasmiques* présentent une orientation variable, mais les striations sombres observées dans les séparations particulières des matériaux les plus dynamiques semblent constituer une forme de ségrégation liée aux contraintes mécaniques.

Les *assemblages plasmiques* les plus représentés sont du type squelsepique, mais les types masepique et omnisepique peuvent être considérés comme en relation avec une certaine dynamique interne.

Les *assemblages élémentaires* sont essentiellement du type porphyrique, avec intertextique associé dans les matériaux sédimentaires.

Les *vides* sont de forme et d'importance assez variables, leur répartition correspond semble-t-il à la relation micro/macroporosité, ainsi qu'à la qualité de la microagrégation.

Les *traits pédologiques* sont présents en proportion variable : quelques revêtements argileux dans les sols marqués par une illuviation peu accentuée, organisation particulière du plasma en bordure des agrégats dans les matériaux soumis à des variations de contraintes plus ou moins importantes, glébules ferriques bien formés ou en voie d'organisation dans les sols soumis aux processus d'hydromorphie, nodules à limites très nettes dus vraisemblablement à une genèse ancienne dans les matériaux issus de l'altération des calcaires.

Selon KUBIENA, la *structure élémentaire* dominante serait du type « porphyropectic », et nous aurions affaire à des types de sols dont le stade *d'évolution micromorphologique* correspond essentiellement au type Braunerde, avec présence de Braunlehm — Teilplasma en quantité variable.

3.53. *Stabilité de structure.*

L'examen des résultats donnés par le test de HÉNIN montre (fig. 3) :

1° Une grande différence entre les argiles sédimentaires et les matériaux argileux issus de l'altération d'un calcaire. L'indice d'instabilité varie de 0,9 pour les horizons supérieurs à 1,9 dans les horizons inférieurs pour les premières, alors qu'il ne dépasse pas 1,0 dans les seconds, même lorsqu'il s'agit d'horizons profonds. Notons cependant qu'en ce qui concerne les argiles sédimentaires marneuses, la présence du calcaire améliore sensiblement la stabilité de la structure.

2° Une perte de perméabilité peut être enregistrée pour tous les horizons profonds à l'exception de l'argile d'altération de travertin de Champigny. Celui-ci conserve une structure favorable à la filtration en raison, semble-t-il, de la faible proportion de calcaire dans les fractions intermédiaires et de la présence d'une charge en éléments grossiers un peu plus élevée, servant ainsi de point de départ à une fissuration efficace. Par contre, la filtration de l'eau dans les produits dérivés du calcaire

de Saint-Ouen reste faible à cause de la présence de calcaire fin qui colmate aisément les pores destinés normalement à l'écoulement de l'eau par gravité.

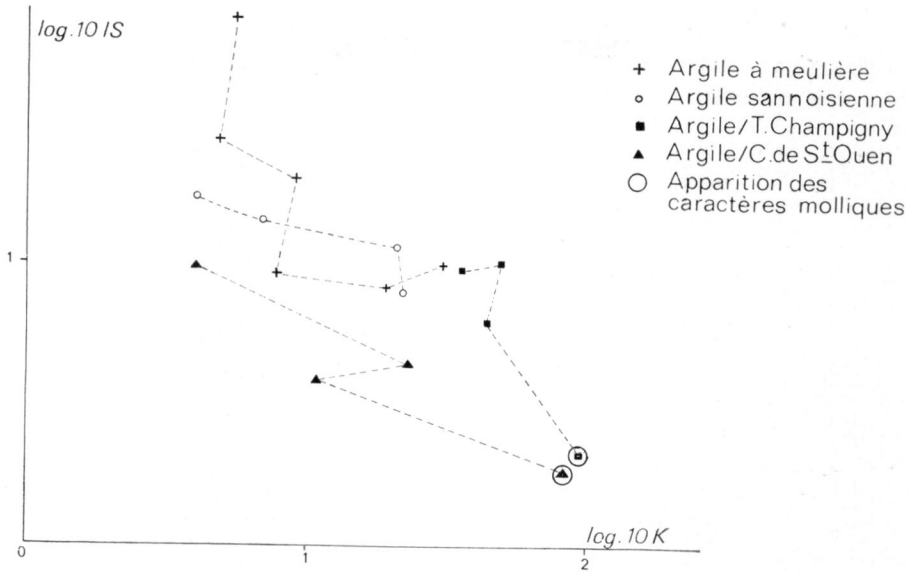



FIG. 3. — *Stabilité de structure*

3° L'apparition des caractères « molliques » est mise en évidence dans les deux argiles d'altération, par une stabilité très élevée et une percolation très favorable.

3.54. *Rétention de l'eau et porosité.*

D'une façon générale, les sols argileux possèdent une très grande porosité, fréquemment de l'ordre de 50 p. 100. Cependant, l'argile à meulière semble être plus compacte et moins bien structurée, ce phénomène étant vraisemblablement lié aux conditions de formation du matériau originel.

La forte proportion d'éléments fins conduit à une microporosité importante entraînant de ce fait une rétention énergique de l'eau.

En conséquence, la macroporosité reste relativement faible dans tous les cas. Le phénomène est le plus accusé pour l'argile à meulière qui présente à la fois une quantité d'eau utile assez faible pour un sol lourd, et une macroporosité très réduite.

3.55. *Comportement mécanique.*

Les matériaux argileux sont caractérisés par leur importante plasticité. L'étude des limites d'Atterberg permet de préciser les relations existant entre le comportement mécanique et la teneur en eau.

Ici encore apparaît nettement une différenciation entre argile sédimentaire et argile d'altération calcaire. Sur le diagramme de Cassagrande (CAQUOT et KERISEL, 1956, p. 44), il est possible de délimiter assez aisément ces deux formations (fig. 4). Tous ces sols présentent des domaines de plasticité étendus, en relation avec leur taux d'argile. Toutefois, ce caractère plastique est un peu atténué pour les argiles à meulières dont le taux d'argile est cependant comparable. Ce fait peut être rapproché de la compacité plus accentuée que nous avions notée auparavant.

L'apparition des caractéristiques « vertiques » dans les sols qui nous occupent semble liée à :

— un domaine plastique suffisamment important (plus de 40),

— un type d'argile manifestant une « activité plastique » voisine de 1 (fig. 5) ; (l'activité plastique d'un sol (SKEMPTON, 1953) est définie par le rapport de l'indice de plasticité au taux d'argile en pour cent),

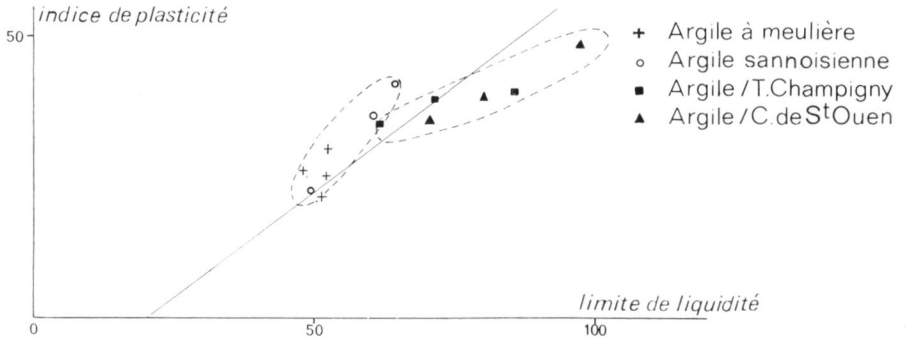



FIG. 4. — *Domaine de plasticité des sols* (Diagramme de Cassagrande)

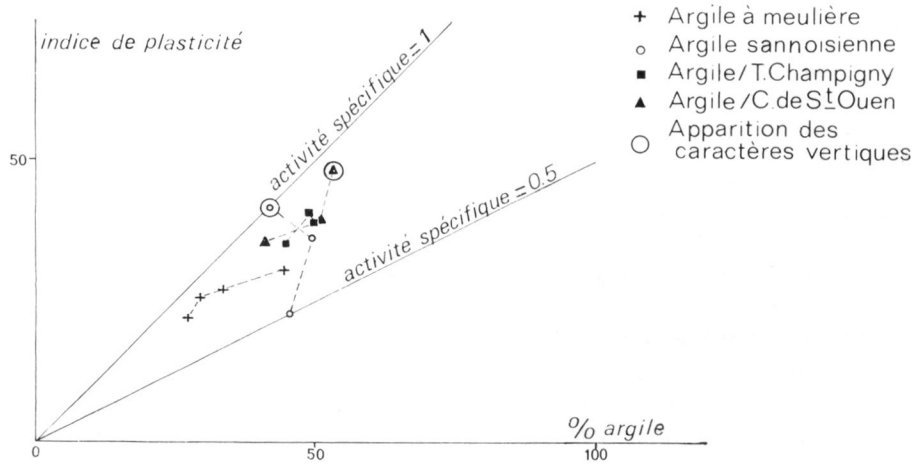



FIG. 5. — *Activité plastique de l'argile* (Diagramme de Skempton)

— un complexe largement saturé en ions bivalents (calcium et magnésium),

— un régime hydrique alternatif, avec une phase d'engorgement marquée.

L'apparition des faces de glissement semble impliquer l'existence préalable d'unités structurales de taille moyenne à grossière, ainsi qu'une faible teneur en fractions granulométriques grossières. L'énergie nécessaire aux travaux de frottement mis en jeu serait due essentiellement aux contraintes internes induites par gonflement et retrait.

Ainsi, les caractères vertiques pourraient exister à l'état potentiel et ne s'exprimer que lorsque toutes les conditions nécessaires sont réunies.

## IV. — CONSIDÉRATIONS AGRONOMIQUES

La notion de terre argileuse implique pour l'agriculteur un comportement particulier vis-à-vis des façons culturales. Les labours y demandent des efforts de traction importants et doivent être pratiqués avant l'hiver pour profiter de l'action ameublissante du gel. La reprise des terres au printemps y est une opération délicate, mais dès que les plantes sont « accrochées », les rendements y sont en général bons.

Nous tenterons de préciser le comportement des terres argileuses de différentes origines à l'aide des caractéristiques analytiques indiquées précédemment.

*Caractéristiques moyennes des différentes formations étudiées*

| | Argiles à meulières | Matériaux argilo-marneux | Niveau de Champigny | Niveau de Saint-Ouen |
|---|---|---|---|---|
| Granulométrie (en p. 100 de terre sèche) | | | | |
| 0/2 μ | 40,0 | 49,0 | 58,4 | 43,6 |
| 2/20 μ | 19,8 | 14,5 | 13,8 | 21,4 |
| 20/50 μ | 30,2 | 21,0 | 18,0 | 24,6 |
| 50/100 μ | 4,0 | 2,1 | 1,8 | 2,6 |
| 100/200 μ | 2,5 | 1,1 | 3,7 | 2,5 |
| 200/2 000 μ | 3,5 | 2,1 | 4,3 | 5,3 |
| Caractéristiques chimiques (en méq./100 g. terre fine) | | | | |
| C.E.B. | 19,1 | 25,5 | 27,1 | 18,6 |
| Bases échangeables : | | | | |
| Ca | 15,60 | Sat. | Sat. | Sat. |
| Mg | 2,50 | 2,27 | 2,38 | 4,70 |
| K | 0,49 | 0,66 | 0,64 | 0,54 |
| Na | 0,24 | 0,26 | 0,26 | 0,09 |
| Caractéristiques physiques | | | | |
| log. 10 $I_s$ | 1,4 | 1,1 | 0,9 | 1,0 |
| log. 10 K | 0,9 | 0,8 | 1,3 | 1,3 |
| Porosité totale (%) | 38,0 | 47,2 | 47,0 | 47,0 |
| pF 2,5 (%) | 31,0 | 41,2 | 45,0 | 36,8 |
| pF 4,2 (%) | 17,5 | 24,0 | 28,1 | 22,8 |
| Eau utile (%) | 13,5 | 17,2 | 17,0 | 14,0 |

### 4.1 — *Caractères généraux*

*a*) Le comportement mécanique particulier des sols argileux est lié à l'existence d'un domaine plastique (intervalle entre limite de plasticité et limite de liquidité) très étendu et couvrant une proportion importante de l'eau utile. Le sol se trouve donc être à l'état plastique au cours d'une grande période de l'année, gênant ainsi les façons culturales.

Il est possible, avec une traction importante, de labourer ces terres à l'état plastique jusqu'au point d'adhésivité, encore qu'il faille quelquefois choisir des ver-

soirs appropriés pour que la terre « passe ». Il en résulte presque constamment une « langue » de terre très lissée qu'il convient d'offrir à l'action du gel. Le labour d'automne, très dressé pour faciliter l'écoulement des eaux, est donc impératif.

Les sols argileux ont, la plupart du temps, une structure très stable. Il s'agit en général de structures à tendance polyédrique ou prismatique, quelquefois plus massive sous la couche arable.

L'assèchement du début du printemps laisse, en surface, des agrégats de quelques millimètres de largeur (d'autant plus larges que la terre est plus compacte). L'épaisseur de cette couche d'agrégats, ou susceptible de donner des agrégats par pulvérisation des mottes, est d'autant plus grande que le gel a été plus prolongé.

Le sous-sol reste très longtemps humide, les agrégats en partie desséchés ayant l'action d'un mulch, le protègent de la dessiccation.

La reprise des labours est donc particulièrement délicate. On doit éviter de toucher à la terre encore trop humide du sous-sol. Les façons doivent donc être superficielles avec des herses passant rapidement pour éclater les mottes déjà fissurées par le gel. Néanmoins, une reprise trop superficielle ne réussit pas à niveler le terrain. Trop profonde, elle « arrache » le sol, créant des mottes compactes et difficilement réductibles après dessiccation. De plus, l'apparition d'une semelle de pseudo-labour est toujours à craindre. Les passages de tracteurs doivent être minimum, en raison du compactage produit dans les sous-sols encore humides.

Toutefois, l'expérience a montré qu'une préparation plus profonde pouvait être favorable à l'implantation de la culture, lorsqu'elle était réalisée après un ressuyage suffisant, dû : soit à des conditions climatiques moins humides, soit à un labour bien adapté.

Le laps de temps favorable aux préparations de printemps est très court. Les exploitations ayant une majorité de terres argileuses ne parviennent généralement pas, avec un équipement normal, à travailler toutes leurs terres en bonnes conditions.

Les semis s'effectuent donc souvent dans des terres assez irrégulières. Ceci incite à une densité de semis plus forte que dans les terres « douces » de limon. Mais alors les éventuels inconvénients des fortes populations peuvent apparaître ultérieurement si les conditions de levée ont été bonnes.

*b*) La macroporosité des terres argileuses, essentiellement constituée par la fissuration du matériau, est relativement faible. Il est difficile d'en faire une évaluation correcte car :

— d'une part, les mesures de laboratoire n'expriment pas, dans les sols à argiles gonflantes, la réalité du terrain ;

— d'autre part, la variation au cours de l'année est considérable en raison des retraits au cours de la dessiccation.

En ce qui concerne l'économie en eau, le cas le plus défavorable se rencontre dans les sols sur argiles sédimentaires relativement moins bien structurées où l'endohydromorphie est marquée. Sur pente légère à moyenne, l'élimination de l'eau se fait par ruissellement ; en position horizontale ou sub-horizontale, l'eau stagne très longtemps entraînant des dégâts par asphyxie sur les céréales d'hiver, ou retardant exagérément les travaux de printemps.

Les sols mieux structurés développés sur produits d'altération de calcaire présentent un écoulement interne généralement favorable à modéré.

*c*) Ces sols ont une forte rétention en eau (de l'ordre de 40 p. 100), l'humidité au point de flétrissement est également importante (de l'ordre de 25 p. 100). De sorte que la quantité d'eau utile est à peine supérieure à celle des sols de limon, soit environ 2,2 millimètres par centimètre. Dès lors, la profondeur du sol garde toute son importance pour assurer la réserve indispensable aux cultures. Les sols à sous-sols rocheux y subissent en été des sécheresses très sévères.

*d*) L'activité biologique de ces terres est relativement réduite, le coefficient de destruction de la matière organique y est assez faible. On pourrait l'estimer à 1 p. 100 environ. En conséquence, ces terres sont assez bien pourvues en matière organique, mais il est vraisemblable que, pour ces terres lourdes souvent bien structurées, cette teneur élevée ne présente en général qu'un faible intérêt (RÉMY, 1970). L'entretien structural par la matière organique est donc beaucoup plus facile à assurer que celui

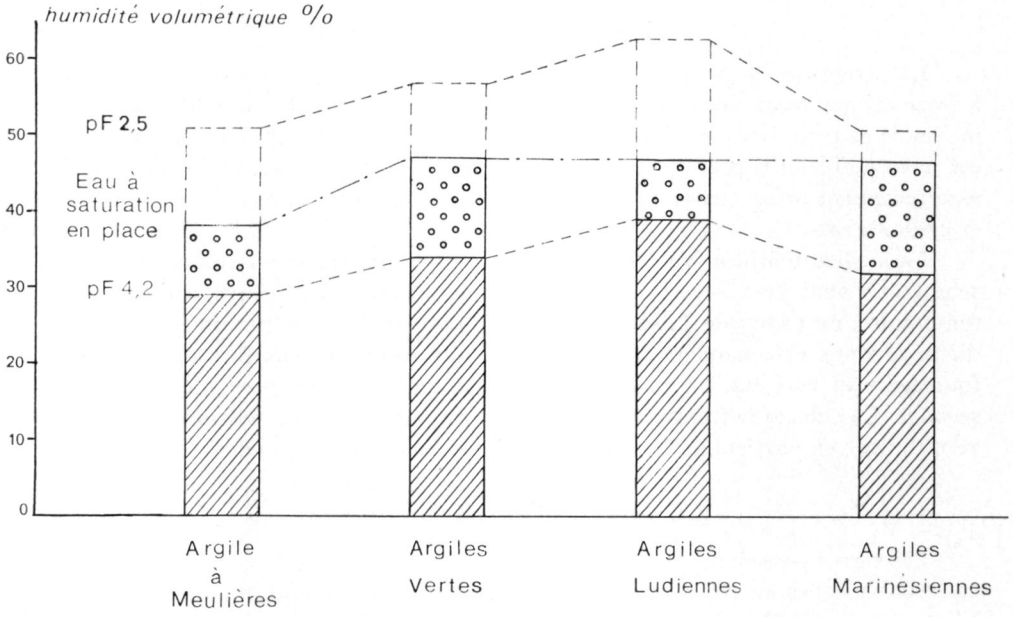



FIG. 6. — *Comparaison des caractéristiques hydriques selon les matériaux*

des terres limoneuses. Cependant, des apports très modestes mais fréquents permettent une stimulation de l'activité biologique.

La minéralisation de l'azote s'y fait assez lentement, en relation avec l'aération qui accompagne la dessiccation. Les pertes par drainage sont relativement modérées car :

— d'une part, la capacité de rétention est élevée (4 à 5 millimètres de pluie n'entraînant l'azote que de 1 cm),

— d'autre part, au cours de l'hiver, les sols gonflés sont peu aérés et présentent des conditions favorables à la réorganisation de l'azote.

Néanmoins, dans les terres peu profondes et fissurées, il peut occasionnellement se produire, au cours de forts orages d'été, des entraînement rapides d'azote nitrique ; malgré des teneurs en azote total importantes, les fumures azotées doivent y rester

comparables à celles pratiquées dans les terres plus légères. Pour les céréales d'hiver, les apports sont à fractionner pour assurer, en début de printemps, une concentration suffisante en azote minéral.

*e*) Le complexe absorbant de ces terres est assez élevé. Il est en général saturé sur toutes les formations issues des marnes ou des calcaires. Les amendements calcaires sont alors inutiles. Par contre, les argiles à meulières sont souvent décalcifiées.

Les teneurs en potasse sont en général normales. Les teneurs en magnésie sont toujours très fortes.

Par contre, toutes ces terres sont naturellement pauvres en acide phosphorique et les fumures de redressement doivent y être importantes et soutenues.

Ci-dessous, nous examinons les particularités agronomiques des terres argileuses issues des quatre formations géologiques précédemment décrites.

### 4.2. — *Argiles à meulières*

La structure est généralement assez compacte, du type polyédrique grossière à prismatique, assez faiblement à modérément développée. La stabilité est souvent moyenne et peut être améliorée par les amendements calcaires. La macroporosité y est assez faible. En conséquence, ces formations sont très peu perméables et leur assainissement présente des difficultés. De plus, ces terres sont souvent peu profondes et caillouteuses.

La meilleure utilisation des sols superficiels paraît être le boisement, les Douglas semblant y venir très bien. Les sols de profondeur moyenne sont utilisables en prairie temporaire, en raison de la sécheresse d'été. Les sols les plus profonds, à condition d'être assainis et amendés, peuvent porter une rotation maïs fourrage ou culture fourragère et céréales. Le maïs grain suppose un bon équipement de récolte et de séchage. La culture betteravière possible, n'y est pas dans des conditions optimales de rentabilité ; en particulier, les difficultés d'arrachage y sont grandes.

### 4.3. — *Formations argilo-marneuses*

Ces terres possèdent généralement une structure assez grossière. D'une porosité convenable, elles se colmatent assez rapidement, ce qui réduit leur perméabilité. Elles sont particulièrement difficiles à prendre car la limite de plasticité est ici très proche du point de flétrissement, le sol restant donc plastique pratiquement toute l'année.

L'économie en eau de ces formations est variable suivant la situation topographique, la teneur en calcaire et le type de végétation. Quelques plages à drainage faible à très faible se rencontrent sur les pentes très adoucies du type concave.

L'abondance de calcaire y ralentit la minéralisation.

Pour les terres les moins argileuses, on cultive essentiellement des maïs fourrage ou des céréales où il y a intérêt à semer dru. La prairie temporaire y a une place importante.

En argiles lourdes ou marnes, il faut se limiter à la prairie permanente.

La populiculture réussit bien dans les endroits les plus humides.

Quelques vignobles s'étendent sur les pentes convexes où intervient un écoulement superficiel suffisant.

### 4.4. — *Argiles ludiennes*

Les argiles dérivées du travertin ont une structure polyédrique angulaire assez fine, bien à très bien développée. La stabilité structurale est particulièrement bonne, même en profondeur. Un simple hersage suffit généralement après labour d'hiver.

Bien qu'ayant une capacité de rétention importante, leur faible profondeur leur confère une réserve en eau insuffisante. La dessiccation est accentuée par la formation de très larges fentes de retrait.

Les plantes sarclées sont à exclure de ces terres sensibles à la sécheresse, sur forte pente, et présentant de ce fait des difficultés de travail et d'arrachage. Cependant, les prairies temporaires (dactyle-luzerne) ou la luzerne seule y viennent de manière satisfaisante. Les rendements en céréales y sont élevés et celles-ci, d'excellente qualité à condition de recevoir de fortes fumures azotées ; un risque d'échaudage est néanmoins à craindre.

On y rencontre un certain nombre de vignobles, mais on doit veiller à l'éventualité de chlorose.

La susceptibilité de ces terrains à l'érosion est assez forte et il convient d'en tenir compte lors de l'aménagement des cultures.

### 4.5. — *Argiles marinésiennes*

Un peu moins bien structurées que les argiles ludiennes, ces terres sont fréquemment assez massives en sous-sol. Plus calcaires que les argiles du travertin, elles deviennent collantes et glissantes à la moindre pluie, ce qui est très défavorable aux façons culturales.

Il est souvent nécessaire d'y rouler les céréales à la sortie de l'hiver pour éviter le déchaussement.

Le sous-sol, renfermant une grande quantité de calcaire fin, possède une réserve en eau importante. De plus, les bandes très argileuses et imperméables occasionnellement présentes au sein du matériau, provoquent une certaine humidité de surface.

Toujours en raison de l'abondance de calcaire tendre, ces terres sont souvent très pauvres en acide phosphorique ; aussi, est-il indiqué d'employer des engrais phosphatés solubles. Les teneurs en magnésie sont très élevées.

La minéralisation y est très faible et les fumures azotées doivent être assez fortes et fractionnées. Dans ces conditions, on peut y obtenir des rendements élevés, la réserve en eau le permettant.

La rotation peut être prairie temporaire ou luzerne suivie de céréales. Les plantes sarclées y sont peu praticables en raison des difficultés à la préparation des sols et à l'arrachage.

Les résineux (sapin de Nordmann ou pin de Corse selon l'exposition) y réussissent.

Certaines zones à exposition favorable sont largement plantées en vigne d'appellation champagne. Le risque de chlorose s'y présente. Des terrains actuellement en friche pourraient permettre l'extension de vignoble.

La susceptibilité à l'érosion est grande sur les pentes, et même des labours judicieusement étudiés n'arrivent pas toujours à l'enrayer.

## V. — CONCLUSIONS

Nous avons tenté de faire une mise au point succincte de nos connaissances actuelles sur quelques sols argileux très répandus dans le bassin parisien.

Tous appartiennent essentiellement aux classes des sols brunifiés ou calcimagnésiques.

Nous nous sommes attachés à montrer les relations souvent étroites qui existent entre les concepts pédogénétiques et ceux permettant la définition des profils culturaux.

Les problèmes posés par la genèse de ces sols, par leur utilisation et leur mise en valeur sont nombreux.

Leur teneur élevée en argile leur confère des propriétés particulières et provoque l'apparition d'un certain nombre de facteurs limitants sur le plan agronomique.

L'ensemble de ces formations argileuses se sépare assez nettement en deux groupes suivant leur origine : formations sédimentaires et argiles à meulières — matériaux d'altération des calcaires.

Les éléments déterminants, responsables de ces différences seraient : l'origine du matériau, la nature lithologique, le mode de dépôt, la texture, la présence d'une charge caillouteuse calcaire, le degré de saturation du complexe.

Il en résulte des propriétés différentes que l'on peut, à titre comparatif, résumer dans un tableau :

| | Argiles à meulières | Matériaux argilo-marneux | Niveau de Champigny | Niveau de Saint-Ouen |
|---|---|---|---|---|
| Facteur originel dominant | altération ancienne | sédimentation | altération | altération |
| Texture | lourde | très lourde | très lourde | lourde |
| Charge caillouteuse | (meulière) | — | faible | assez élevée |
| Saturation du complexe | faiblement désaturé | saturé | saturé | saturé |
| Structure | moyenne | assez bonne | bonne | bonne |
| Stabilité de structure | assez faible | bonne | bonne | bonne |
| Perméabilité | mauvaise | mauvaise | très bonne | bonne |
| Caractères « vertiques » | absents | fréquents | présents | rares |
| Caractères « molliques » | absents | très rares | présents | présents |

Les matériaux issus de l'altération des formations calcaires sont nettement mieux structurés, plus stables et à drainage très favorable, contrairement à ce que l'on observe dans les argiles à meulières.

Sur l'ensemble des caractéristiques, les matériaux argilo-marneux se présenteraient comme étant légèrement en transition entre les deux groupes définis.

Sur le plan pédologique, il faut noter la faible part du lessivage dans la formation

de ces sols. Toutefois, un horizon B peut pratiquement toujours être décrit soit parce qu'il présente quelques revêtements argileux, témoins d'une légère illuviation dans les sols les moins lourds, soit à cause de la présence d'une structure plus marquée. Il s'agit alors d'un (B) « cambique ».

Des caractères « vertiques » plus ou moins marqués se manifestent dans les sols développés sur argiles lourdes calcarifères, ainsi qu'à un degré moindre dans les produits d'altération des calcaires du Bartonien.

L'apparition de ces caractères semble liée à un indice de plasticité supérieur à 40, pour des sols saturés en ions bivalents. La présence d'une charge en éléments grossiers semble devoir limiter leur développement.

Formations toujours assez difficiles à travailler, certaines sont chimiquement pauvres comme les argiles à meulières, d'autres sont sensiblement plus riches.

D'une manière générale, l'utilisation agricole de ces formations présente des difficultés ayant trait principalement au travail du sol, ces terres doivent en effet être labourées en hiver pour subir l'action du gel. Les façons culturales doivent ensuite être réalisées très rapidement au printemps, lorsque le sol est suffisamment ressuyé mais lorsqu'il n'est pas encore trop sec. En cas d'hydromorphie, il est nécessaire d'assainir dans la mesure du possible pour pénétrer plus tôt dans ces terres.

Il convient de tenir compte de la profondeur du sol car, retenant très énergiquement l'eau, la réserve facilement utilisable n'est guère plus importante qu'en sol de limon.

On constate donc que les sols étudiés présentent des caractéristiques très différentes suivant l'origine du matériau originel.

L'ensemble des observations exposées et des interprétations présentées semble justifier la nécessité de dissocier les différents matériaux tant sur la base de leur origine et de leur nature lithologique que sur celle de leur granulométrie.

Dans une cartographie à grande échelle, ils doivent être délimités et décrits séparément puisqu'ils sont justiciables d'un traitement très différent au niveau de la parcelle.

Les problèmes de classification régionale sont directement liés à ces principes, ainsi que ceux concernant la définition précise des unités de sols et par là leur utilisation.

*Reçu pour publication en mars 1970.*

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer ici tous nos remerciements à nos collègues et collaborateurs qui nous ont conseillés ou aidés au cours de la réalisation de ce travail :

M. J. HÉBERT, Directeur de la Station agronomique de l'Aisne, pour les nombreux conseils et critiques judicieuses qu'il n'a jamais cessé de nous prodiguer ; MM. J. BERLAND, M. VATINEL et J. CIMETIÈRE de l'équipe de cartographie de Château-Thierry ; M. J.-P. SEBBE qui s'est chargé d'effectuer de nombreuses analyses mécaniques ; enfin, tout le personnel du Service de Cartographie des Sols de l'Aisne et de la Station agronomique de Laon, tout particulièrement Mme J. DAMIEN, Melle F. CLERMONT et M. J. LAMBERT.

## SUMMARY

### CONTRIBUTION TO THE PEDOLOGICAL AND AGRONOMIC STUDY OF THE CLAY SOILS OF THE PARISIAN BASIN — THE HAUTE BRIE

The clay formations of « Haute Brie » occupy the borders of the plateau where there are changes of gradient, or occur as big outcrops on the slopes.

A climate of Atlantic type has not produced marked conditions of leaching in these soils.

The clay soils in question present a fairly wide diversity, basically due to their origins. Broadly speaking, they can be divided into two groups, one consisting of only slightly modified sedimentary formations and millstone grit, the other derived from much-weathered limestone.

The sedimentary clays, more compact and of inferior structure, usually show signs of anaerobism and endohydromorphism. The clays derived from the breaking up of limestone, on the other hand, have a very favourable structure, sometimes even displaying « mollic » characteristics on the surface.

The progressive appearance of « vertic » characteristics was noted where the plasticity index was sufficiently high and the complex saturated. A tendency to leaching may, however, occur even in the lightest soils in the form of thin clay coatings. As a rule, only the structure, being more marked at a certain level in the profile, makes it possible to define a horizon (B).

Thus, all the soils observed belong either to the class of brown earth soils or to that of calcio-magnesium soils.

These heavy formations are very difficult to work even when they have not the added disadvantage of hydromorphism. Ploughing done in the autumn has to be repeated lightly in the spring during the very short drying-out season. In some cases, however, it was possible to plant the cereals without ploughing.

In spite of certain similarities common to all clay soils, clearly marked characteristics differentiate these soils on both pedological and agronomic grounds, so that it is important to trace their boundaries on a large-scale map and to make them the subject of a detailed study.



## ZUSAMMENFASSUNG

### BEITRAG ZUR BODENKUNDLICHEN UND AGRONOMISCHEN UNTERSUCHUNG DER TONBÖDEN DES PARISER BECKENS « LA HAUTE BRIE »

Die lehmigen Bodenformationen von Haute-Brie bedecken die Ränder von Hochebenen, als Bruch des Abhangs, oder bilden grosse Ausstreichungen auf Berghängen.

Ein atlantisches Klima hat bei diesen Böden keine durch Auslaugung gekennzeichneten Bedingungen geschaffen.

Diese lehmigen Böden weisen eine ziemlich grosse Mannigfaltigkeit auf, die im wesentlichen mit ihrem Ursprung zusammenhängt.

Können sie kurzerfasst in zwei grossen Gruppen eingeteilt werden, von denen die eine zu den wenig veränderten Ablagerungsformationen und zu den Tonböden mit Mühlensandstein gehört, die andere aus bedeutenden Veränderungen der Kalkböden herrührt.

Die abgelagerten Tonböden, die kompakter und weniger gut strukturiert sind, bieten am häufigsten Erstickungs- und Endohydromorphie-Phänomene.

Die Lehmböden, die aus der Veränderung von Kalkgestein entstanden sind, bieten dagegen eine sehr günstige Struktur an, die bis zur Erscheinung von « weichen » Eigenschaften gehen mag.

Es konnte die allmähliche Erscheinung von « saftigen » Eigenschaften beobachtet werden, da der Plastizitätsgrad ausreichend ist und der Komplex gesättigt ist.

Eine Tendenz zur Auslaugung kann jedoch in den am wenigsten schweren Böden erscheinen, in der Form von lehmigen, wenig starken Deckschichten.

Im allgemeinen, allein die in einer bestimmten Höhe im Profil mehr ausgeprägte Struktur erlaubt eine Sohle (B) zu bestimmen.

Alle beobachteten Böden gehören jedoch entweder zur Gruppe der Braunböden oder zur Gruppe der Kalzium-Magnesium-Böden.

Bei allen diesen schweren Formationen ist die Bodenbearbeitung schwierig; und diese Schwierigkeiten sind durch das Auftreten von Hydromorphie noch vergrössert.

Die im Herbst durchgeführten Bodenbearbeitungen müssen im Frühjahr während der sehr kurzen Austrocknungsperiode oberflächlich wieder aufgenommen werden.

In bestimmten Fällen könnten die Getreide ohne Bodenbearbeitung eingepflanzt werden.

Trotz gewisser Ähnlichkeiten, die allen Lehmböden eigen sind, unterscheiden sich die verschiedenen Böden, durch sehr gut festgestellte Besonderheiten sowohl in pedologischer wie auch in agronomischer Hinsicht, sodass es wichtig ist, in einem Kartenwerk mit sehr grossem Massstab und mit einer sehr genauen Untersuchung die Böden abzugrenzen und darzustellen.

## РЕЗЮМЕ

*К педологическому и агрономическому изучению глинистых почв Парижского бассейна.*

*Вышнее Бри.*

М. ЖАМАНЬ, Л. БЛИЕ, Ж. К. РЭМИ.

Глинистые почвы Вышнего Бри занимают края плоскогорья в разрывах откосов, или образовывают крупные обнажения на склонах.

Климат атлантического типа не создает ярко выраженных условий для выщелачивания этого материала.

Эти глинистые почвы представляют довольно большое разнообразие, связанное главным образом с их происхождением. Вобщем их можно включить в две группы, первая из которых относится к седиментационным, мало изменившимся образованиям и к щебневатым кремнистым глинам, в то время как вторую можно отнести к продуктам сильного выветривания известкового материала.

В седиментационных глинах более компактных и менне оструктуренных часто наблюдаются явления асфиксии и эдногидроморфизма. У глин происходящих от выветренных известняков, напротив, отмечается весьма благоприятная структура, которая часто доходит до поверхностного появления « моллик эпипедонов ».

При достаточном показателе пластичности и насыщенном комплексе можно наблюдать появление характеристик напоминающих « вертисолы ». Тенденция к выщелачиванию может все-же появиться в почвах наименее тяжелых, в форме небольших глинистых покрытий. Обычно, только структура более заметная на определенном уровне профиля, позволяет определить горизонт (Б).

Все наблюдавшиеся почвы принадлежат значит к классу обуревших почв, или-же к классу почв известково-магниевых.

Эти тяжелые образования представляют большие трудности для обработки, усложненные еще в некоторых случяах гидроморфностью. Вспашки проведенные осенью нужно поверхностно возобновить весною, во время очень короткого периода подсыхания. Иногда злаки можно сеять без вспашки.

Несмотря на некоторые характеристики общие для всех глинистых

образований, почвы эти можно различить как в смысле педологическом, так и агрономическом, благодаря некоторым заметным их особенностям; а это важно для их разграничения и описания при картографировании в крупном масштабе и при детальном изучении почв.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


AUBERT G., 1963. La classification des sols : la classification pédologique française 1962. *Cahiers de pédologie, O. R. S. T. O. M.*, **3**, 1-7.

BONNEAU M., DUCHAUFOUR P., MILLOT G., PAQUET H., 1965. Note sur certains sols vertisoliques formés en climat tempéré. *Bull. Serv. Carte Géol. Als.-Lorr.*, **17** (4), 325-344, Strasbourg.

BONNEAU M., DUCHAUFOUR P., LE TACON F., NGUYEN KHA., 1967. Note sur quelques sols développés sur substratum argileux. *Pédologie*, **17** (1), 106-118, Gand.

BREWER R., 1964. *Fabric and mineral analysis of soils*, John Wiley et Sons, Inc. New-York, London, Sidney.

CAQUOT et KERISEL, 1956. *Traité de Mécanique des Sols* (3e édition). 558 p., Gauthier-Villars, Paris.

DE LEENHER L. Difficultés de l'étude de la structure du sol et le problème de l'échantillonnage. *Pédologie*, **12** (1), 67-82.

DUCHAUFOUR P., 1965. *Précis de Pédologie*, Masson et Cie Édit., Paris.

HÉBERT J., JAMAGNE M., BLIET L., 1964. *Mémoire des Cartes de Sols de Montmirail, Carte des sols de l'Aisne*. 168 p., Publ. Chambre d'Agriculture, Station agronomique de Laon.

HÉBERT J., JAMAGNE M., BLIET L., 1965. *Mémoire des Cartes de Sols de Château-Thierry 7-8/Épernay 5-6* 207 p. *Carte des sols de l'Aisne*. Publ. Chambre d'Agriculture. Station agronomique de Laon.

HÉNIN S., FÉDOROFF A., GRAS R., MONNIER G., 1960. *Le profil cultural. Principes de physique du sol*. 320 p., Soc. d'Éditions des Ing. agric. Paris.

JAMAGNE M., 1964. Introduction à une étude pédologique dans la partie nord du Bassin de Paris. *Pédologie*, **14** (2), 228-342. Gand.

JAMAGNE M. et coll., 1966. Principes de classification régionale des sols. *Science du Sol*, **2**, 41-64.

KUBIENA W. L., 1938. *Micropedology*. Collegiate Press, Ames, Iowa.

KUBIENA W. L., 1953. *Soils of Europe*. Thomas Murby and Co., London.

LARUELLE J., 1965. *Notes on Soil Micromorphology*. International Training Center for Post. Graduate Soil Scientists. University of Ghent.

MUCKENHAUSEN E., 1962. *Entstehung. Eigenschaften und Systematik der Böden Der Bundesrepublik Deutschland*. 148 p. OLG Verlag GMBH. Frankfurt/Main.

MUCKENHAUSEN E., 1963. Die Schweren Böden Europas. *Z. Pflanz. Düngung., Bodenkunde*, **104** (2), 97-110.

PELTIER R., 1954. *Manuel du Laboratoire routier*. Dunod, Paris, 274 p.

POMEROL Ch., FEUGUEUR L., 1963. L'Éocène du Bassin de Paris. *Bull. Soc. Belge Géol.*, 385-446.

RIEDEL C.-E., FRANC DE FERRIÈRE J., 1951. *Les sols et les climats de la Brie*. Chez les auteurs. 232 p.

RÉMY J.-C., 1970. Influence de la constitution physique des sols sur le comportement mécanique ; signification des limites d'Atterberg en matière de travail du sol (en préparation).

SKEMPTON A. W., 1953. *The colloidal activity of clays*. Proc. Zurich, 1-14.

TAVERNIER R., SMITH G. D. 1957. The concept of Braunerde (Brown Forest Soil) in Europe and the United Stades. *Advances In Agr.*, **9**, 217-289. Acad. Press. Inc. Publ., New York.

XXX, 1960. Soil Classification. A comprehensive system, 7th Approx. Soil Survey Staff. *Soil Conservation Service U. S. D. A.*. Suppl. 1964-1967.

XXX, 1967. *Classification des sols*. Commission de Pédologie et Cartographie des sols. I. N. R. A.

## ANNEXE

### MÉTHODES UTILISÉES

*Principes de description des profils*

Techniques du Service de Cartographie des Sols de l'Aisne.

*Méthodes analytiques*

— Analyse granulométrique : dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium et densimétrie, méthode S. MÉRIAUX.

— Carbone : attaque sulfochromique à chaud, méthode C. THOMANN.

— Azote : Kjeldahl.

— Calcaire total : calcimètre Bernard.

— Densité : la densité absolue est obtenue par mesure au picnomètre, la densité apparente par prélèvement de cylindres calibrés dans le profil.

— Stabilité de structure : méthode S. HÉNIN et collaborateurs.

— Capacité de rétention (pF 2,5) et point de flétrissement (pF 4,2) : méthode RICHARDS.

— Limites d'Atterberg : norme A. S. T. M. (PELTIER, 1954).

— Acide phosphorique assimilable : méthode DYER au-dessous de 3 p. 100 de $CaCO_3$ ; méthode JORET et HEBERT au-dessus.

— Capacité d'échange : extrait à l'acétate d'ammonium neutre normal et distillation après lavage par l'alcool éthylique.

— Bases échangeables : Ca par précipitation oxalique, Mg par complexométrie, K et Na par photométrie de flamme.

— Fer libre : méthode DEB.

— Calcaire actif : méthode DROUINEAU.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (2), 159-195.

# CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'ACTION D'UN VERSOIR SUR LE SOL (1)

## II. — Comportement du sol travaillé par un versoir de charrue (2)

A. FAURE

*Laboratoire des Sols,*
*Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles*
*Institut national de la Recherche agronomique*

RÉSUMÉ

Dans un premier article, une classification des versoirs a été proposée. Un certain nombre de grandeurs caractéristiques sont ainsi trouvées définies.

L'outil étant connu, cette deuxième partie utilise un certain nombre d'hypothèses de plus en plus proches du comportement réel du matériau sur le versoir. Chacune d'elles, cependant, est une étape intéressante comme ayant des conséquences exploitables. Ces hypothèses font ressortir la nécessité d'utiliser les théories de la mécanique des milieux déformables pour expliquer l'existence des mottes et des lignes de glissement.

Ainsi une nouvelle orientation doit être donnée, tant sur le terrain qu'en laboratoire, aux études effectuées sur le retournement de la bande de terre.

## INTRODUCTION

Dans un précédent article (Faure, 1969), nous avons défini trois classes de versoirs et proposé un ensemble de tests d'identification. Nous avons donc été amené à définir de façon globale les diverses actions du versoir.

Le présent article a pour objet d'essayer de préciser l'une d'entre elles (mouvement de la terre sur le versoir) dont toutes les autres ne sont que des conséquences.

Dans un premier chapitre, le sol est considéré comme un fluide, ce qui permet de formuler quatre hypothèses de plus en plus proches du comportement réel du maté-

(1) Extraits d'une thèse de 3e cycle soutenue le 18 décembre 1968 à la Faculté des Sciences de Grenoble.

(2) La première partie a été publiée dans le nº 6, 1969, des *Annales agronomiques*.

riau. Elles n'ont qu'une certaine approximation mais offrent des conclusions déjà exploitables.

Cependant, la mécanique des milieux continus est insuffisante pour expliquer la formation des mottes. Aussi, le deuxième chapitre donne-t-il les résultats de diverses observations effectuées sur les déformations du sol et les théories inspirées de celles utilisées en Mécanique des sols avec les murs de soutènement.

Ce parallélisme entre les murs de soutènement et les versoirs ne doit pas être surprenant si on considère le problème plus général de l'écoulement d'un fluide sur une surface plane ou gauche.

Cet écoulement sur une surface gauche est maintenant l'objet d'études sur maquette de versoir. Si les conclusions espérées ne sont peut-être pas exploitables dans un avenir immédiat pour les praticiens, elles présenteront l'avantage d'apporter une meilleure compréhension du comportement du sol au cours de son labour et d'orienter les recherches vers des voies moins fondamentales.

## Chapitre Premier

## ÉTUDE DU MOUVEMENT DE LA BANDE DE TERRE

Dans ce chapitre, l'étude des contraintes et des forces mises en jeu n'est pas abordée. Le matériau est supposé homogène, continu et isotrope. Sa section est supposée rester plane pendant le mouvement. En premier lieu celle-ci est supposée indéformable. Cette première hypothèse (Hypothèse $H_1$), très simple, ne permet qu'une comparaison entre l'état initial et l'état final de la bande labourée. Elle permet également d'obtenir une valeur approximative du foisonnement du sol après labour et remet une nouvelle fois au premier plan l'importance des courbes limites du versoir.

Cependant, pour déterminer les trajectoires des particules, il est nécessaire d'admettre que sur les surfaces du soc et du versoir la bande labourée est déformée. Cette déformation, due au fait que la terre se déplace sur une surface non plane, est supposée (Hypothèse $H_2$) se produire sans aucune dilatation ni contraction dans le matériau ($\varepsilon_{ij} = 0$). Les essais effectués sur le terrain par certains auteurs mettent toutefois en évidence les insuffisances de cette attitude. Il est donc de nouveau nécessaire de faire un autre pas en avant et de tenir compte des dilatations ou contractions dans le plan $xOy$ (Hypothèse $H_3$, $\varepsilon_{xx} \neq 0$, $\varepsilon_{yy} \neq 0$, $\varepsilon_{zz} = 0$). Enfin certains auteurs ont généralisé cette dernière hypothèse en considérant également les contractions et les dilatations qui se créent dans le matériau parallèlement à la direction $Oz$ (Hypothèse $H_4$, $\varepsilon_{ij} \neq 0$).

Ces quatre hypothèses ont chacune leur propre intérêt car il est possible de donner à chacune d'elles un prolongement pouvant servir de base à de nouvelles expériences ou de point de comparaison à des résultats expérimentaux.

### I. — Hypothèse $H_1$ : matériau indéformable

#### A. — *Étude générale*

Avec cette hypothèse, la comparaison entre l'état initial et l'état final de la bande labourée apporte des éclaircissements sommaires mais instructifs.

HÉNIN (1960), FEUERLEIN (1966) et BARRETT (1967) notamment, ont considéré cet aspect du problème et ont ainsi mis en évidence le rôle du rapport $\rho = \frac{\text{largeur}}{\text{profondeur}} = \frac{L}{P}$. La bande de terre labourée est supposée pivoter autour de sa charnière extrême (point C, fig. 1) avant que celle-ci ne soit soulevée par le soc.

Le mouvement de la bande de terre se décompose dans le plan transversal (perpendiculaire à la direction d'avancement) en une rotation d'angle $\frac{\pi}{2}$ autour de la charnière C et une rotation d'angle $\varphi$ autour de la nouvelle charnière $B_1$. Soit $\psi$ l'angle d'inclinaison de ces bandes de terre une fois labourées. Les deux rotations respectant la distance $Bb$, $B_1b_1 = L$ et $\sin \psi = \frac{P}{L}$, ce qui entraîne nécessairement $\rho > 1$. Ces deux rotations ont pour résultante une rotation d'angle $\frac{\pi}{2} + \varphi$ et de centre $\Omega$ (fig. 2) dont la position est définie par le longueur $h$ telle que $h = \frac{P \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}{1 + \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}$. La section $A_2B_2C_2D_2$ ne reste appuyée sur $a_2b_2c_2d_2$ que si le point $D_2$ est du côté de $a_2b_2c_2d_2$ par rapport à

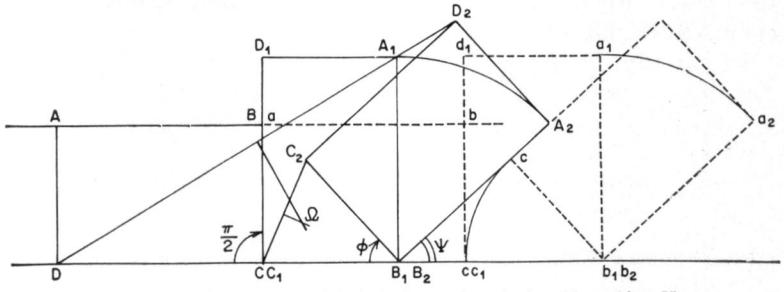



FIG. 1. — *Mouvement global de la section droite. Hypothèse $H_1$. Angle de basculement*

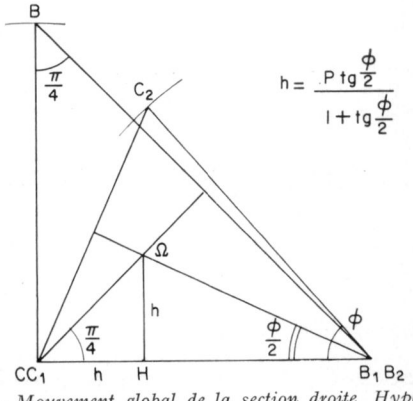



FIG. 2. — *Mouvement global de la section droite. Hypothèse $H_1$. Position du centre de la rotation résultante*

la verticale de $B_2$. On obtient ainsi une limite supérieure $\psi_{max.}$ pour l'angle d'inclinaison. Soit $\varphi$ l'angle $A_2 B_2 D_2$, il vient $\operatorname{tg} \varphi = \frac{P}{L} = \frac{1}{\rho}$ d'où :

$$\operatorname{tg} \psi_{max.} \times \operatorname{tg} \varphi = 1 \text{ ainsi } \rho^4 - \rho^2 - 1 = 0 \text{ ou } \rho_m = \left(\frac{1 + \sqrt{5}}{2}\right)^{1/2}$$

Pour que le retournement soit assuré, il faut donc que $\rho$ vérifie la condition $\rho > \rho_m$.

### B. — *Conditions de foisonnement maximal*

Les hypothèses faites par ces auteurs n'ont qu'une valeur de première approximation, car il faut bien noter que la non déformabilité de la section droite de la bande labourée, néglige les possibilités de « moulage » de ses éléments sur la surface gauche du versoir.

Il est certes hors de doute que le caractère très restrictif de ces hypothèses n'a pas échappé à ces auteurs, et l'intérêt de cette approche se trouve dans sa simplicité et dans les prolongements théoriques qui peuvent être utilisés comme base pour une étude plus expérimentale.

1. *Foisonnement dû au labour.*

Il nous a paru intéressant de déterminer la valeur du foisonnement, rapport du volume des « vides » (section $B_1 c_2 b_1$) au volume de la bande de terre en position initiale (section ABCD), ainsi :

$$n = \frac{\text{Surface } (B_1 c_2 b_1)}{\text{Surface (ABCD)}} = \frac{B_1 c_2 \times c_2 b_1}{2 \text{ P. L}}$$

or,

$$B_1 c_2 = (L^2 - P^2)^{1/2} = P\,(\rho^2 - 1)^{1/2} \text{ d'où } n = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{1}{\rho^2}\right)^{1/2}$$

Le foisonnement est maximal quand la surface du triangle $B_1 b_1 c_2$ est elle-même maximale, c'est-à-dire : quand $B_1 c_2 = c_2 b_1 = P$; on obtient dans ce cas $L = P\sqrt{2}$, ainsi $\rho = \sqrt{2}$ est $n_{max} = \frac{100\ \%}{2\sqrt{2}} = 35{,}4\ \%$.

L'angle d'inclinaison $\psi$ est évidemment égal dans ce cas à $\frac{\pi}{4}$.

Si on tient compte de la porosité initiale du sol, soit $n_2$, le volume total des vides est alors non plus $\frac{1}{2} P^2 (\rho^2 - 1)^{1/2}$, mais :

$\frac{1}{2} P^2 (\rho^2 - 1)^{1/2} + n_0 PL - n_0 P^2 (\rho^2 - 1)$ et dans ce cas, la nouvelle valeur du foisonnement est $n - n_0$ avec $n = n_0 + \frac{(1 - n_0)\sqrt{\rho^2 - 1}}{2\rho}$.

2. *Conditions géométriques de foisonnement maximal*

Le fait que la charnière C ne soit pas soulevée dans la première partie de la rotation entraîne une condition géométrique pour le versoir que des calculs ne peuvent

exprimer simplement en toute généralité. En effet, dans un labour suffisamment lent (ce qui est en général le cas pour un labour moulé) où les énergies cinétiques mises en jeu et les forces d'inertie sont faibles, le retournement de la bande n'est possible que si au moment où le point C arrive en contact avec le soc, la première rotation est complète. Alors le versoir a amené le point D à la verticale de C. Cette condition pour le point D impose une restriction de type géométrique pour le versoir.

En outre, pour que la bande de terre soit dans la position finale $A_2B_1C_2D_2$, il faut que le bord intérieur du versoir soit tel que lorsque la rotation d'angle ($\varphi$) est complète, le point $C_2$ soit « abandonné » par le versoir. La découpe de ce bord intérieur doit donc permettre le dégagement du point C lorsqu'il a été soulevé d'une hauteur $H = P \sin \varphi$ appelée hauteur de dégagement.

Ces conditions font ressortir le rôle primordial des paramètres de DALLEINNE, (1962) ayant une influence sur le dégagement de la raie de labour [1].

Ces conclusions ont été appliquées à deux types de versoirs. Le premier conduit à l'impossibilité du dégagement total, ce qui entraîne la formation d'une charnière intermédiaire passant par un point C′ de CD.

a) *Cas du versoir hélicoïdal.*

Soit un versoir hélicoïdal droit de rayon R dont l'axe $\Omega Z$ est horizontal, situé dans le plan $xOz$ de la semelle de labour. Ainsi $(\overrightarrow{Oz}, \overrightarrow{OX}) = \beta$ est l'angle d'attaque du soc. A l'instant $t = 0$, le point D de la section ABCD considérée jusqu'à présent est « pris » par la pointe du soc située à l'origine O des coordonnées. Soit ($\Omega XYZ$) le trièdre trirectangle intrinsèque à l'hélicoïde (fig. 3).

Les équations paramétriques de cette surface dans ses axes sont :

$$X = r\cos\theta, \qquad Y = r\sin\theta, \qquad Z = h\,(\pi - \theta)$$

Dans le système d'axes $Oxyz$, il vient :

$$\begin{aligned} x &= -h(\pi - \theta)\cos\beta + (r\cos\theta + R)\sin\beta \\ y &= r\sin\theta \\ z &= h(\pi - \theta)\sin\beta + (r\cos\theta + R)\cos\beta \end{aligned}$$

L'angle $\mu$ étant défini comme l'angle du dièdre formé par le plan du soc avec le plan horizontal, il vient :

$$(\operatorname{tg}\mu)_{max} = \left(\frac{\frac{\partial y}{\partial\theta}}{\frac{\partial z}{\partial z}}\right)_0 = \left(\frac{-r\cos\theta}{h}\right)_0 = \frac{R}{h}$$

La rotation ($\varphi$) est complète quand le point $B_2$ arrive sur la ligne de contact du soc avec la semelle de labour, c'est-à-dire sur OX, alors :

$$x_{B_2} = P + L, \qquad \text{et} \qquad \theta_{B_2} = \pi \qquad \text{ainsi :}$$
$$x_{B_2} = (R - r_{B_2})\sin\beta = P + L, \; y_{B_2} = 0, \; z_{B_2} = (R - r_{B_2})\cos\beta$$

[1] Cf. Faure A., *Ann. agron.*, 1969, 6.

en outre, la cote de $C_2$ est la même que celle de $B_2$. On peut écrire :

$$x_{C_2} = P + L - P\cos\varphi = -h(\pi - \theta)\cos\beta + (r_{C_2}\cos\theta + R)\sin\beta \quad (1)$$

$$y_{C_2} = r_{C_2}\sin\theta = P\sin\varphi \quad (2)$$

$$z_{C_2} = \frac{P + L}{\operatorname{tg}\beta} = h(\pi - \theta)\sin\beta + (r_{C_2}\cos\theta + R)\cos\beta \quad (3)$$

de ces trois équations on obtient par éliminations successives :

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{\pm P\sin\varphi\sin\beta}{P + L - P\cos\varphi\sin\beta - R\sin\beta} \quad (4)$$

et

$$h = \frac{P\cos\varphi\cos\beta}{\pi - \theta} \quad (5)$$

tg $\mu$ étant défini, l'équation (1) donne alors le rayon du cylindre directeur de l'hélicoïde.

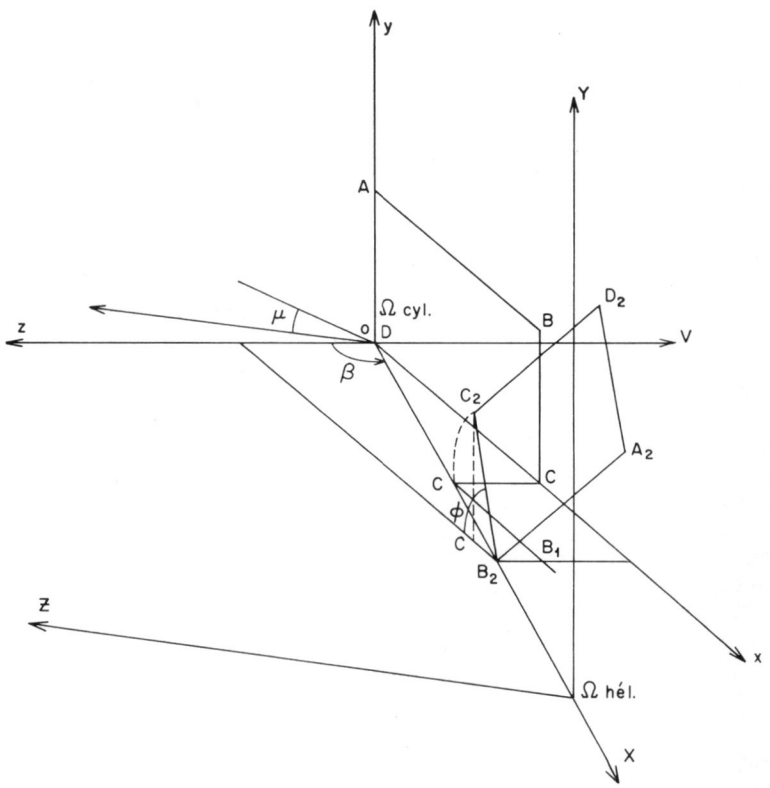



FIG. 3. — *Hypothèse $H_1$. Condition de dégagement d'un versoir*

*Exemple numérique* : considérons à titre d'exemple une charrue 12 pouces, dont le versoir est du type considéré, de largeur de travail L = 30 cm. Cherchons s'il est possible d'obtenir le foisonnement maximal défini précédemment ; dans ce

cas, il vient $P = \frac{30}{\sqrt{2}}$. Les valeurs moyennes des angles caractéristiques pour ce type de versoir sont :

$$\alpha = 22^{0},\ \beta = 41^{0}30,\ \text{et}\ \mu = 32^{0}30,\ \text{alors,}$$

$$(1)\ \text{donne}\ R = 0{,}637\ h,\ (5)\ \text{donne}\ h = \frac{11{,}235}{\pi - \theta}\ \text{et}$$

$$(4)\ \text{donne}\ \operatorname{tg}\theta = \pm \frac{9{,}93}{44{,}6\,263 - \frac{4{,}7\,377}{\pi - \theta}}$$

Mais pour que la terre soit soulevée, il faut que le point $D_2$ soit entre les points O et $\Omega$ et non au-delà de $\Omega$, c'est-à-dire que R doit vérifier la relation $R > \frac{R + L}{\sin\beta}$. Tous calculs faits, $h > \frac{30\,(\sqrt{2} + 1)}{0{,}637 \times 0{,}662 \times \sqrt{2}}$ cm/rd

dans ce cas, par l'équation (3) :

$$\pi - \theta > \frac{11{,}235 \times 0{,}637 \times 0{,}662 \times 1{,}414}{30 \times 2{,}414}\ \text{ou}\ \theta > \pi - 0{,}0925\ \text{rd}$$

La valeur minimale de l'angle $\theta$ est 174°30 environ, or cette condition ne peut satisfaire l'équation (4) dont la solution la plus proche de cette limite inférieure est $\theta = 161^{0}30$, déterminée par approximations successives. Un tel versoir ne donnera pas le foisonnement maximal. Pour y parvenir, il faudait par exemple incliner l'axe du cylindre directeur par rapport au plan horizontal.

b) *Cas du versoir cylindrique.*

Considérons un versoir cylindrique dont la base est la parabole (P) dans le plan des YZ. Dans le système d'axes $\Omega XYZ$, les équations paramétriques de ce cylindre sont (fig. 3) :

$$X = r \qquad Y = 2a\,\frac{\operatorname{tg}\theta - \operatorname{tg}\mu}{\operatorname{tg}\theta}\ \text{et}\ Z = 2a\,\frac{\operatorname{tg}\theta - \operatorname{tg}\mu}{\operatorname{tg}^2\theta}$$

Son équation cartésienne étant $Y^2 + 2a\,(Z \operatorname{tg}\mu - Y) = 0$, la valeur du paramètre de la parabole de base est ainsi $p = a \operatorname{tg}\mu$.

Dans le système d'axes $Oxyz$ il vient :

$$x = -2a\,\frac{\operatorname{tg}\theta - \operatorname{tg}\mu}{\operatorname{tg}^2\theta}\cos\beta + r\sin\beta$$

$$y = 2a\,\frac{\operatorname{tg}\theta - \operatorname{tg}\mu}{\operatorname{tg}\theta}$$

$$z = 2a\,\frac{\operatorname{tg}\theta - \operatorname{tg}\mu}{\operatorname{tg}^2\theta}\sin\beta + r\cos\beta$$

Les mêmes conditions de labour que dans le cas précédent s'écrivent :

$x_{B_2} = P + L$, mais ici $\theta_{B_2} = \mu$, alors :

$z_{B_2} = r\cos\beta$ $x_{B_2} = r\sin\beta = P + L$ et $y_{B_2} = 0$. Comme la cote de $C_2$ est la même que celle de $B_2$, les coordonnées de $C_2$ sont :

$$x_{C_2} = P + L - P\cos\varphi = -2a\,\frac{\operatorname{tg}\theta - \operatorname{tg}\mu}{\operatorname{tg}^2\theta}\cos\beta + r_{C_2}\sin\beta \qquad (6)$$

$$y_{C_2} = P \sin \varphi = 2\,a\,\frac{\operatorname{tg}\,\theta - \operatorname{tg}\,\mu}{\operatorname{tg}\,\theta} \tag{7}$$

$$z_{C_2} = 2\,a\,\operatorname{tg}\,\theta - \operatorname{tg}\,\mu \sin\beta + r_{C_2}\cos\beta \tag{8}$$

$$\text{d'où} \quad \operatorname{tg}\,\theta = \frac{2\,a\,\operatorname{tg}\,\mu}{2\,a - P \sin\varphi}$$

Pour que le retournement dans les hypothèses données soit possible, il faut que, à la hauteur $H = P \sin \varphi$ au-dessus de la semelle de labour, la longueur du versoir soit égale à $l_{min.} = P + L' - P \sin \varphi$. Ainsi, la longueur de la génératrice du versoir, à partir de la muraille, est égale à :

$$\lambda = \frac{P + L'}{\sin\beta} - P\cos\varphi\sin\beta - P\,\frac{\cos\varphi\cos^2\beta}{\sin\beta}$$

c'est-à-dire :

$$\lambda = \frac{L'}{\sin\beta}(\cos\varphi + \sin^2\beta) \quad \text{(fig. 4)}$$

*Exemple numérique* : avec une charrue de 12 pouces, $L' = 30$ cm. Pour obtenir le foisonnement maximal après labour, les valeurs moyennes des angles caractéristiques étant les mêmes, il faut donc que $l_{min.} = 36{,}22$ cm et ainsi $\lambda = 54{,}70$ cm.

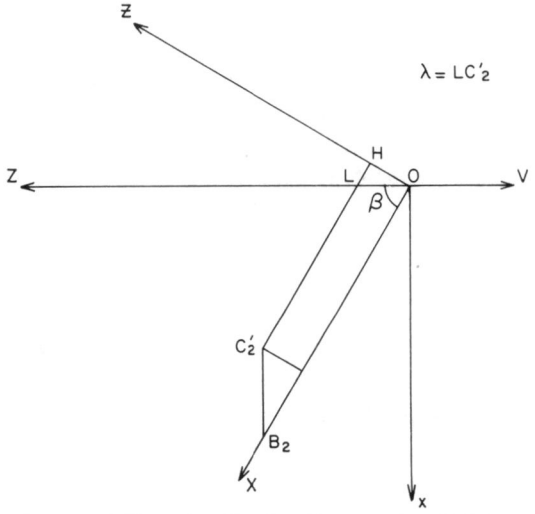



FIG. 4. — *Hypothèse $H_1$. Cas d'un versoir cylindrique*
*Condition de possibilité de retournement*

## II. — HYPOTHÈSE $H_2$ : DÉFORMABILITÉ RESTREINTE $\varepsilon_{ij} = 0$

L'hypothèse $H_1$ ne peut être qu'une première approche de l'étude du mouvement de la bande labourée. Comme il a déjà été précisé, il est en effet évident que le matériau est nécessairement déformé par la surface non plane du versoir.

Dans un but d'établir une base simple servant de modèle de comparaison aux essais effectués par certains auteurs, la déformation du matériau est maintenant supposée être caractérisée par des extensions nulles ($\varepsilon_{ij} = 0$). Ainsi sous cette hypothèse nouvelle, à un instant donné la section ABCD (fig. 5) restant plane, l'arc $D_1H_1$ est constamment égal au segment DH correspondant à la position initiale de ABCD, ainsi $D_1H_1 = DH = x_1$.

Considérons à titre d'exemple un versoir cylindrique ayant pour base une parabole et ayant des génératrices horizontales faisant un angle β avec la direction d'avancement du versoir. Supposons qu'à l'instant $t = 0$ le point D soit à la pointe du soc,

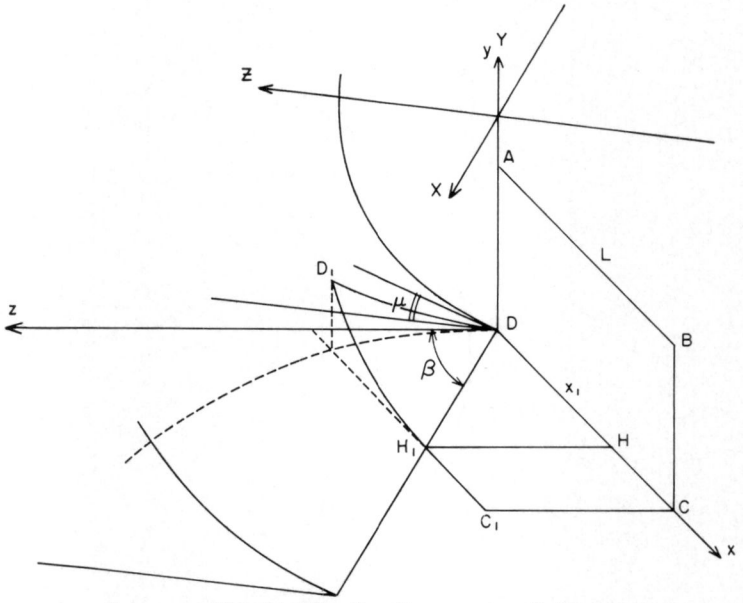



FIG. 5. — *Hypothèse $H_2$. Cas d'un versoir cylindrique. Trajectoire du point* D

ses coordonnées sont alors $x = y = z = 0$. L'arc $D_1H_1$ est un arc de la parabole (P) intersection du cylindre et du plan vertical $z = \dfrac{x_1}{\operatorname{tg} \beta}$ (9). Dans ses axes, le versoir a pour équation $Y^2 + 2a \operatorname{tg} \mu Z - a^2 = 0$ et il suffit de déterminer la longueur de l'arc $D_1H_1 = s$. Dans les axes habituellement choisis, l'équation de versoir est :

$$y^2 - 2ay - 2a \operatorname{tg} \mu (x \cos \beta - z \sin \beta) = 0$$

Compte tenu de (9), il vient :

$$y^2 - 2ay - 2a \operatorname{tg} \mu \cos \beta (x - x_1) = 0$$

ou

$$y^2 - 2ay - 2a \operatorname{tg} \nu (x - x_2) = 0 \ (^1)$$

Ainsi

$$ds^2 = \left[1 + \frac{(y - a)^2}{y^2 \operatorname{tg}^2 \nu}\right] dy^2$$

Paramétrons la parabole (P) par l'angle $\varphi$ que fait la normale en un point avec l'axe $Ox$, $\varphi = (\overrightarrow{D_1n}, \overrightarrow{Ox})$ (fig. 6) alors $\operatorname{tg} \varphi = \dfrac{y - a}{a \operatorname{tg} \nu}$. En orientant l'arc de la parabole dans le sens des $\varphi$ croissants, il vient :

$$ds = a \operatorname{tg} \nu \frac{d\varphi}{\cos^3 \varphi} \text{ comme pour } t = 0 \qquad \varphi_0 = \nu - \frac{\pi}{2}$$

(1) Se rapporter à la première partie, FAURE A., 1969, *Ann. agron.* (6).

$$s = \frac{a \operatorname{tg} \nu}{4}\left[\operatorname{Log}\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} + \frac{2\sin\varphi}{\cos^2\varphi} - A_0\right] = \frac{a \operatorname{tg} \nu}{4}[A - A_0]$$

où

$$A_0 = \operatorname{Log}\frac{1-\cos\nu}{1+\cos\nu} - \frac{2\cos\nu}{\sin^2\nu}$$

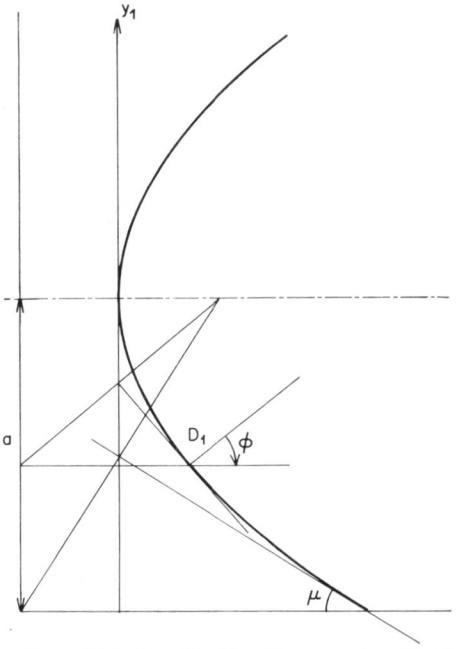



FIG. 6. — *Hypothèse $H_2$. Cas d'un versoir cylindrique. Définition du paramètre « φ »*

Écrivons que $s = x_1$, les coordonnées du point $D_1$ à l'instant $t$ sont :

$$z = \frac{s}{\operatorname{tg}\beta} \qquad y = a\,(1 + \operatorname{tg}\nu \operatorname{tg}\varphi)$$

et

$$x - s = \frac{a}{2\operatorname{tg}\nu}(\operatorname{tg}^2\nu \operatorname{tg}^2\varphi - 1).$$

*Exemple numérique* : considérons un versoir de 12 pouces, $\alpha = 22^0$, $\beta = 41^030$, $\mu = 32^030$, et $\nu = 25^030$. Dans ces conditions $A_0 = -12{,}738$ et le tableau 1 définit les valeurs des coordonnées du point $D_1$. Les figures 7 et 8 donnent les projections de la trajectoire de ce point dans les plans $xOz$ et $xOy$.

La loi horaire du mouvement est donc définie par le fait que la composante de la vitesse du point D sur l'axe $Oz$ est constante et égale, mais opposée, à la vitesse d'avancement du versoir. Ceci traduit que le déplacement longitudinal de la bande de terre est nul, alors $z = Vt$

d'où

$$\frac{a \operatorname{tg} \nu}{4}\left[\operatorname{Log}\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} + \frac{2\sin\varphi}{\cos^2\varphi} - A_0\right] = V \operatorname{tg}\beta\, t$$

Il est évident que les trajectoires des points du segment DC se déduisent par une simple translation de la trajectoire du point D le long du soc. Naturellement ces trajectoires ne sont pas indéfinies car le versoir lui-même ne l'est pas. En outre l'action de forces telle que la pesanteur peuvent les modifier en créant des décollements ou des chutes prématurées.

TABLEAU I

*Trajectoire dans l'hypothèse $H_2$*

| $\varphi^0$ (degrés) | A | $\frac{s}{a}$ | $\frac{x}{a}$ | $\frac{y}{a}$ | $\frac{z}{a}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| — 60 | — 9,562 | 0,378 9 | 0,046 5 | 0,173 7 | 0,428 2 |
| — 50 | — 5,727 | 0,836 4 | 0,127 3 | 0,431 3 | 0,945 1 |
| — 40 | — 3,718 | 1,076 1 | 0,196 0 | 0,599 7 | 1,216 0 |
| — 30 | — 2,432 | 1,229 5 | 0,260 9 | 0,724 7 | 1,389 3 |
| — 20 | — 1,475 | 1,343 7 | 0,327 3 | 0,826 3 | 1,518 4 |
| — 10 | — 0,710 | 1,434 9 | 0,394 3 | 0,916 0 | 1,621 4 |
| 0 | + 0 | 1,519 6 | 0,471 6 | 1,000 0 | 1,717 1 |
| + 10 | + 0,710 | 1,604 3 | 0,563 7 | 1,084 0 | 1,812 9 |
| + 20 | + 1,475 | 1,695 6 | 0,679 2 | 1,173 7 | 1,916 0 |
| + 30 | + 2,432 | 1,809 8 | 0,841 2 | 1,275 3 | 2,045 1 |
| + 40 | + 3,718 | 1,963 2 | 1,083 1 | 1,400 3 | 2,218 4 |
| + 50 | + 5,727 | 2,202 9 | 1,493 8 | 1,568 7 | 2,489 3 |
| + 60 | + 9,562 | 2,660 4 | 2,328 0 | 1,826 3 | 3,006 2 |

Cette hypothèse $H_2$, moins restrictive que la précédente est implicitement contestée par certains auteurs dont les essais font apparaître des déformations dans le matériau.

## III. — Hypothèse $H_3$

### déformabilité dans la section droite ($\varepsilon_{zz} = 0$)

Dans la détermination de l'angle d'inclinaison de la bande de terre labourée Feuerlein (1966) apporte un complément aux études précédentes par des mesures sur le terrain de cet angle d'inclinaison à l'aide de témoins placés dans le matériau. Les résultats obtenus montrent que la valeur moyenne de cette inclinaison est inférieure à la valeur théorique calculée sous l'hypothèse $H_1$. En effet la courbure, imposée par la forme du versoir aux côtés initialement horizontaux de la bande de terre, est dirigée vers le bas et, de ce fait, la corde joignant les extrémités de l'arc formé est plus inclinée sur le plan horizontal (fig. 9).

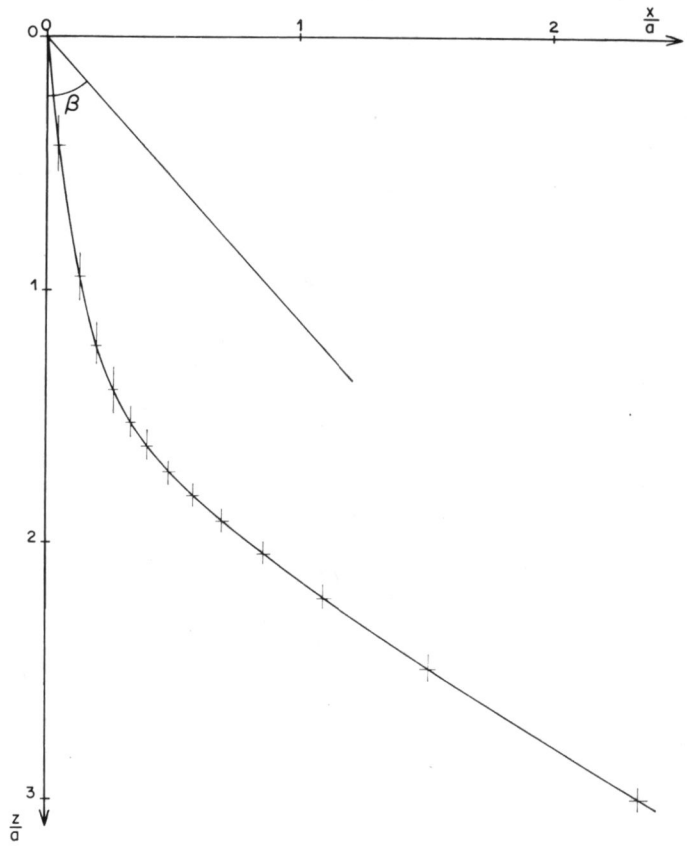



FIG. 7. — *Hypothèse $H_2$. Cas d'un versoir cylindrique*
*Projection sur le plan horizontal de la trajectoire du point D*

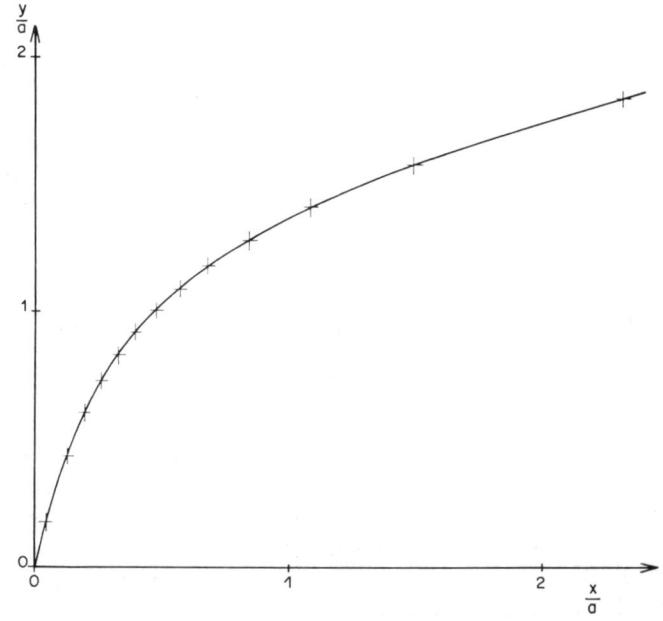



FIG. 8. — *Hypothèse $H_2$. Cas d'un versoir cylindrique.*
*Projection sur le plan transversal de la trajectoire du point D*

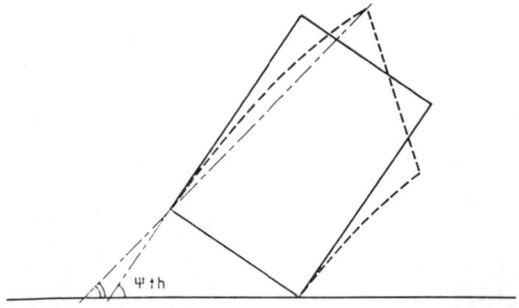



FIG. 9. — *Hypothèse $H_3$. Influence de la déformation dans la section droite sur l'inclinaison des bandes de terre*

## A. — *Étude de* O'CALLAGHAN *et* MAC COY

O'CALLAGHAN et MAC COY (1963) ont considéré expérimentalement l'action d'un versoir à l'aide de témoins plantés dans un sol naturel et ont ajusté des équations polynômiales, sous forme de développements illimités, aux trajectoires ainsi obtenues. Comme $\varepsilon_z = 0$, $z = v_z t$, et le mouvement du centre de gravité d'un prisme élémentaire de hauteur $y_0$ et de section $\delta x$ et $\delta z$ est alors défini par les équations

$$x = B_3 + B_2 z + B_1 z^2 + \ldots\ldots \text{ et } y = C_1 + C_2 z + C_3 z^2 + \ldots\ldots$$

Les composantes de la vitesse et de l'accélération sont calculées par différenciation, ce qui permet de calculer le module de ces deux quantités :

$$V = (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)^{1/2} \text{ et } \Gamma = (\gamma_x^2 + \gamma_y^2)^{1/2}$$

En déterminant les trajectoires des particules sur deux versoirs différents (versoir A 10 pouces, 28 de longueur, et versoir B 11 pouces, 30 de longueur) O'CALLAGHAN obtient les courbes de la figure 10. Les calculs précédents, à l'aide des équations polynômiales empiriquement établies, permettent alors une comparaison instructive des vitesses et des accélérations à des vitesses de travail différentes.

## B. — *Trajectoire théorique*

Dans le cadre de l'étude de O'CALLAGHAN et MAC COY, il est intéressant de préciser l'hypothèse $H_3$ en supposant par exemple que le matériau est étiré dans la direction $Ox$, proportionnellement au temps. Ainsi $\varepsilon_x = k$ d'où $\dot{\varepsilon}_x = kt$, la nouvelle valeur $s'$ de l'arc $s$ une fois étiré est alors donnée par $\dfrac{s' - s}{s} = kt$.

La trajectoire du point D est déterminée en écrivant que la section ABCD est supposée rester plane dans un plan vertical perpendiculaire à la direction d'avancement. Ceci entraîne que $z = Vt$ est toujours vérifiée et que $z = \dfrac{s}{\operatorname{tg} \beta}$. Ainsi, pour une valeur de $s$ donnée par le tableau 1, correspond une valeur de $t$ donnée par $s = V \operatorname{tg} \beta\, t$. Cette valeur de $t$ détermine, pour $k$ déterminé comme caractéristique du matériau, la valeur de la dilatation, donc de $s'$. La nouvelle position du point D est sur la parabole (P) et $s'$ vérifie l'équation $s' = V \operatorname{tg} \nu\, (A' - A_0)$ qui définit une nouvelle valeur de A, donc de $\varphi'$. Les équations paramétriques de la parabole (P) déterminent alors les nouvelles coordonnées du point D'.

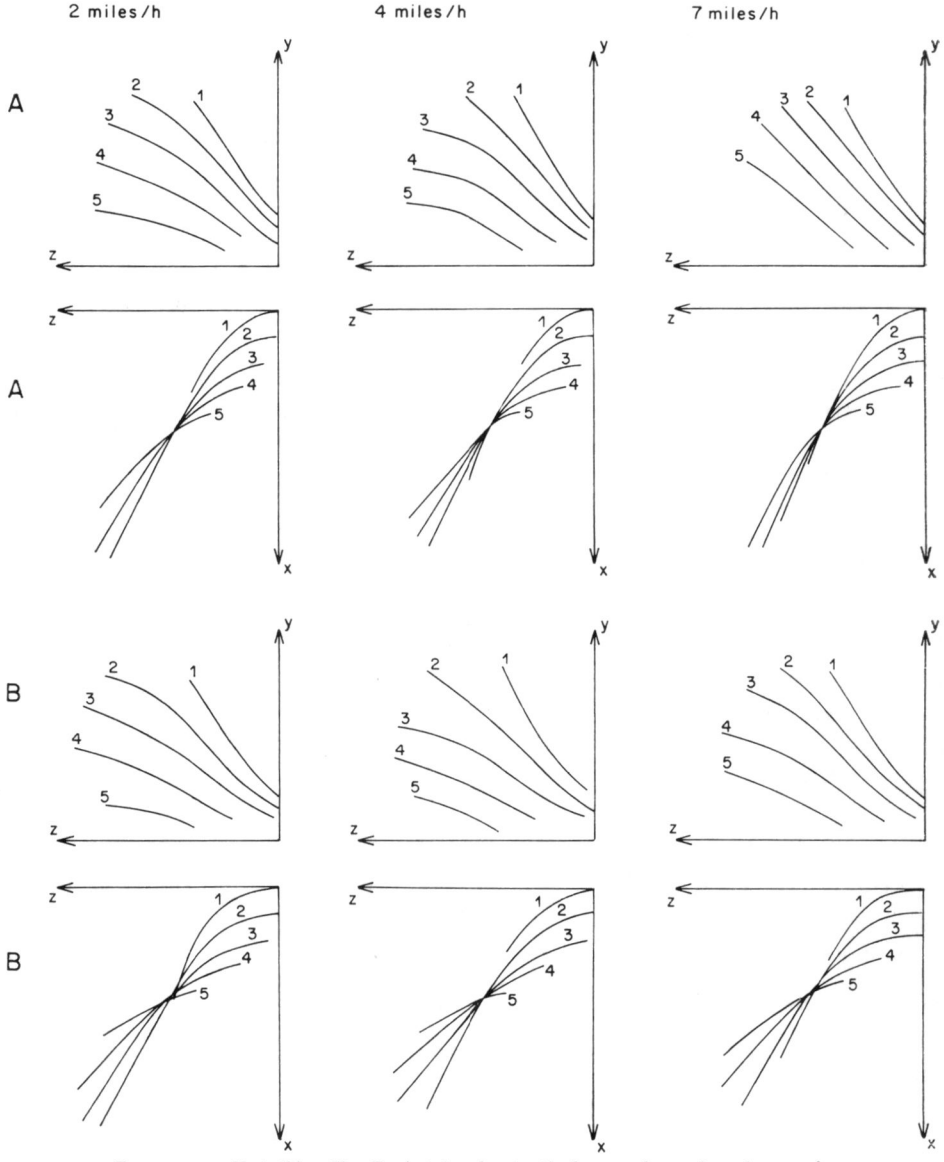



FIG. 10. — *Hypothèse $H_3$. Trajectoire des particules sur la surface du versoir. Résultats de* O'CALLAGHAN *et* MAC COY

A. Versoir 10 pouces, longueur : 28
B. Versoir 11 pouces, longueur : 30

*Exemple numérique* : il a été choisi à titre d'exemple le versoir cylindrique déjà utilisé et la valeur du module d'élasticité défini précédemment $k$ a été prise égale à $k = 0{,}2\ s^{-1}$. Le tableau 2 donne les différentes étapes de calculs et les figures 11 et 12 donnent les projections de la trajectoire du point D′ sur le plan $xOy$ et $xOz$, dans ces nouvelles hypothèses. La vitesse de travail est V = 3,6 km/h.

TABLEAU 2

*Trajectoire dans l'hypothèse $H_3$*

| $\frac{s}{a}$ | $t$ (secondes) | $\frac{\sigma}{a}$ | A′ | $\varphi'$ (degrés) | $\frac{y'}{a}$ | $\frac{x'}{a}$ | $\frac{z'}{a}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,378 9 | 0,085 64 | 0,385 46 | — 9,506 30 | — 59,54 | 0,177 13 | 0,040 5 | 0,428 2 |
| 0,836 4 | 0,189 02 | 0,868 05 | — 5,459 44 | — 48,55 | 0,453 21 | 0,101 7 | 0,945 1 |
| 1,076 1 | 0,243 20 | 1,128 51 | — 3,275 30 | — 37 | 0,640 53 | 0,163 6 | 1,316 0 |
| 1,229 5 | 0,277 86 | 1,297 85 | — 1,855 27 | — 24,12 | 0,755 64 | 0,229 7 | 1,389 3 |
| 1,343 7 | 0,303 68 | 1,425 38 | — 0,785 84 | — 11 | 0,907 27 | 0,304 7 | 1,518 4 |
| 1,434 9 | 0,324 28 | 1,528 00 | + 0,074 70 | + 1,10 | 1,008 78 | 0,387 0 | 1,621 4 |
| 1,519 6 | 0,343 42 | 1,624 02 | + 0,879 89 | + 12,20 | 1,104 27 | 0,483 0 | 1,717 1 |
| 1,604 3 | 0,362 58 | 1,720 75 | + 1,691 04 | + 22,20 | 1,195 95 | 0,596 5 | 1,812 9 |
| 1,695 6 | 0,383 20 | 1,825 62 | + 2,570 45 | + 31,15 | 1,289 44 | 0,735 4 | 1,916 0 |
| 1,809 8 | 0,409 02 | 1,957 97 | + 3,680 30 | + 39,45 | 1,396 72 | 0,926 7 | 2,045 1 |
| 1,963 2 | 0,443 68 | 2,137 50 | + 5,185 78 | + 47,45 | 1,525 13 | 1,204 2 | 2,218 4 |
| 2,202 9 | 0,494 86 | 2,422 38 | + 7,574 70 | + 55,45 | 1,700 57 | 1,669 3 | 2,489 3 |
| 2,660 4 | 0,601 24 | 2,980 41 | + 12,25417 | + 64 | 1,977 99 | 2,607 6 | 3,006 2 |

## IV. — Hypothèse $H_4$ : déformabilité totale du matériau

Si l'hypothèse $H_3$ donne un complément d'informations sur le comportement du sol travaillé, elle semble cependant insuffisante. Elle est, sans aucun doute, simple et moins restrictive que les deux précédentes, mais elle fait intervenir une anisotropie fondamentale dans le comportement du matériau en le supposant inextensible dans une direction privilégiée. White (1918) établit, le premier probablement, les trajectoires des particules de sol sur un versoir quelconque de façon expérimentale et a observé avec un soin particulier les déformations à l'aide de témoins. La déformabilité dans la direction $Oz$ a été ainsi mise en évidence.

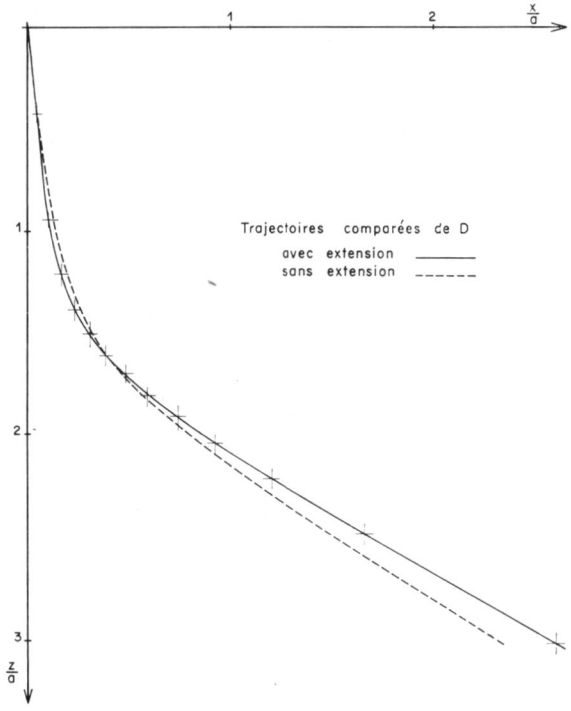



FIG. 11. — *Hypothèse $H_3$. Projection sur le plan horizontal des trajectoires comparées selon $H_2$ et $H_3$*

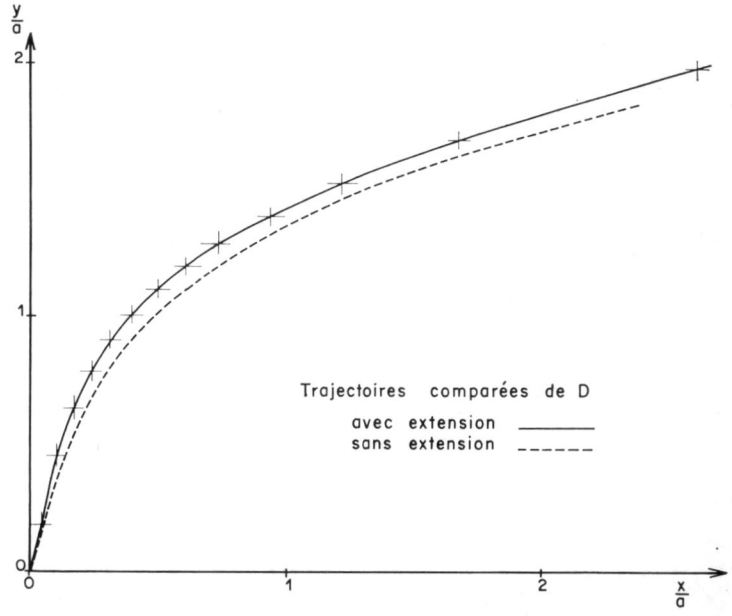



FIG. 12. — *Hypothèse $H_3$. Projection sur le plan transversal des trajectoires comparées selon $H_2$ et $H_3$*

## A. — *Expériences de* WHITE

WHITE (1918) utilise un labour sous prairies de façon à pouvoir considérer la bande de terre retournée comme continue. Grâce à des témoins plantés verticalement et à des distances égales, WHITE observe :

— que la face du copeau contre la muraille est décompactée pendant le retournement, la partie supérieure l'étant moins que la partie inférieure ;

— que la face libre du côté du labour antérieur semble au contraire subir une contraction sur sa partie supérieure et n'être ni tendue ni contractée sur sa partie inférieure.

Ces observations entraînent comme conclusion immédiate qu'il existe une ligne neutre dans la section transversale du copeau qui passe par le point C. Cette ligne neutre, soit CN, partage la section transversale en deux parties : ANCD tendue et NBC contractée (fig. 13). En outre, ces témoins font apparaître qu'au cours de l'écoulement du copeau sur le versoir, les fissures formées initialement au passage du soc, sur la face tendue, se resserrent quand le sol passe sur l'arrière du versoir. WHITE en conclut qu'il existe un point d'extension maximale.

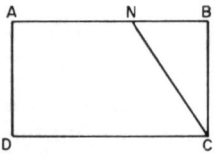



FIG. 13. — *Hypothèse $H_4$. Déformation de la section transversale d'après* WHITE

En vernissant la surface du versoir, WHITE a matérialisé les trajectoires des particules de la face inférieure du copeau et a déterminé les projections sur le plan horizontal et le plan vertical perpendiculaire à la direction d'avancement (fig. 14 et 15).

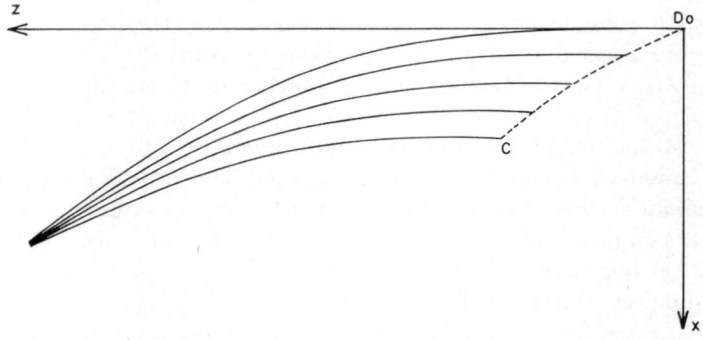



FIG. 14. — *Hypothèse $H_4$. Projection sur le plan horizontal des trajectoires obtenues par* WHITE

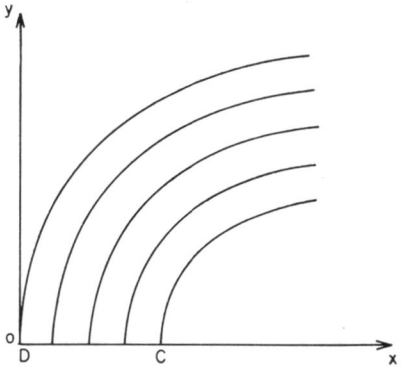



FIG. 15. — *Hypothèse $H_4$. Projection sur le plan transversal des trajectoires obtenues par* WHITE

B. — *Interprétation*

En projection horizontale WHITE a utilisé des équations polynômiales de la forme suivante :

$$ax^2 + bz^2 + lxz + mx + nz + d = 0 \qquad (10)$$

et en projection verticale sur le plan $xOy$ :

$$a_1x^2 + b_1y^2 + l_1x + m_1y + d_1 = 0 \qquad (11)$$

A l'aide de ces deux équations et de la loi horaire supposée connue, il est possible de déterminer les composantes de la vitesse et de l'accélération d'une particule.

Il faut donc connaître la relation $z = f(t)$, loi horaire du mouvement du sol dans le sens longitudinal. Si Z est la distance parcourue pendant le temps $t$ par le versoir avançant à une vitesse constante $v$ connue, il vient : $Z = vt$. WHITE mesure alors la différence $z$ — Z entre les positions du versoir et la cote $z$ des repères plantés dans le sol.

Des difficultés certaines ont été rencontrées à cause de l'état peu homogène du sol naturel qui, de plus, contenait un pourcentage important de cailloux, mais il a été cependant possible de mettre en évidence que la différence $z$ — Z tendait à passer par une valeur maximale.

Afin de normaliser ses essais, WHITE leur a imposé six conditions de travail :

— quand $z = 40$ pouces, $Z = 40$ pouces pour chaque trajectoire ;

— il n'y a pas d'extension ni de contraction au point C ;

— $(z - Z)_{max.}$ pour les témoins les plus proches de la muraille est égale à 1,05 pouce ;

— $(z - Z)_{max.}$ décroît uniformément de A vers B ;

— l'extension sur chaque trajectoire croît uniformément jusqu'à ce que $(z - Z)$ soit maximal et ensuite décroît uniformément jusqu'à ce que $z = Z = 40$ ;

— l'extension maximale a lieu à mi-chemin entre le point où la particule de sol est prise par la charrue et le point $s = 40$.

Sur ces données, WHITE peut alors écrire :

$$z - Z = a_2 (Z^2 + b_2Z + c_2)^2$$

c'est-à-dire :

$$z - vt = a_2 \left[(vt)^2 + b_2vt + c_2\right]^2$$

Cette équation définit $\frac{dz}{dt}$ et $\frac{d^2z}{dt^2}$ composantes de la vitesse et de l'accélération des particules de sol dans la direction d'avancement du versoir. A l'aide des équations (10) et (11) on peut alors calculer les quatre composantes de la vitesse et de l'accélération dans les deux autres directions.

## V. — Conséquences

Ces deux études ont l'avantage de tirer le plus grand parti possible des calculs théoriques des vitesses et d'être en liaison étroite avec les essais poursuivis parallèlement. Cependant le fait d'avoir ajusté des équations polynômiales aux trajectoires expérimentales donne un caractère empirique aux résultats obtenus. Tout en mentionnant l'aspect « Mécanique des sols » par l'utilisation des caractéristiques comme la granulométrie et les densités, et tout en ayant déterminé les grandeurs fondamentales (contraintes de cisaillement et angles de frottement interne) des matériaux utilisés, White et O'Callaghan ne prennent pas en considération le comportement intrinsèque du sol au cours de son retournement. Ils n'étudient que partiellement la nature des déformations.

Il est certain qu'il est toujours possible d'ajuster un développement illimité à l'équation d'une courbe et, en ce sens, l'étude de O'Callaghan est plus précise que celle de White sur le plan mathématique. Toutefois, ce dernier aborde l'étude des déformations pendant l'écoulement et fait apparaître un écart entre la cote de la particule et l'avancement du versoir.

Si les courbes obtenues par White sont comparées à celles de O'Callaghan d'une part, et à celles des figures 11 et 12 dans l'hypothèse de la déformabilité restreinte d'autre part, il apparaît une certaine analogie compte tenu des différences de versoirs utilisés dans chaque cas. Ceci montre que l'hypothèse $H_3$ bien que trop restrictive, est une approche intéressante du comportement réel du matériau et que les développements limités ou non au deuxième degré permettent tout de même une bonne approche empirique de la détermination des trajectoires.

L'attitude adoptée au cours de ce chapitre a des conséquences pratiques dans le domaine de la dynamique, que nous n'aborderons pas ici, mais elle est largement insuffisante pour déterminer le comportement intrinsèque du matériau. Ce comportement ne peut donc pas être étudié de façon approfondie en conservant le cadre des théories de la résistance des matériaux et il est indispensable de considérer le matériau comme un fluide soumis à un critère d'écoulement et subissant de grandes déformations.

Le chapitre II adopte cette nouvelle attitude, étudie la répartition des contraintes et des déformations dans le matériau travaillé (métal ou sol) et donne les résultats expérimentaux ou théoriques obtenus selon les critères choisis.

## Chapitre II

# ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES DÉFORMATIONS ET DES CONTRAINTES

Il est possible d'aborder l'étude du comportement d'un matériau de deux façons différentes : soit par l'observation et la mesure éventuelle de ses déformations au cours de son déplacement (attitude déjà adoptée par White et O'Callaghan au chapitre I) de façon à mettre en évidence les directions des plans de cisaillement quand ils existent, soit par la détermination du champ de contraintes en choisissant certaines hypothèses relatives, en particulier, au critère d'écoulement.

## I. — Déformations du sol au cours de son labour

Certains auteurs ont orienté leurs essais sur le processus de déformations du sol travaillé par un versoir. Le matériau étant élasto-plastique, ils ont précisé les types de sol qui donnent naissance à des plans de cisaillement.

### A. — *Comportement des différents types de sols selon* Nichols *et* Reed

Nichols et Reed (1934) ont analysé et classé les différents types de sols rencontrés sur le terrain et utilisés pour leurs essais. Sohne (1966) a repris cette classification en la modifiant par certaines considérations sur la granulométrie.

1. *Sols très compacts.*

Nichols et Reed appellent ainsi les sols dont la densité apparente est élevée. En outre, ces sols sont relativement secs. Dans ces conditions ils se brisent irrégulièrement en blocs compacts en avant de la charrue. La réaction du sol est alors mal définie (schéma 1, fig. 16).

2. *Sols sous prairies.*

Un tapis de racines à faible profondeur arme le sol et lui donne une plus grande cohésion. Ces auteurs n'observent pas de plan de cisaillement contrairement au labour sous chaume. Les déformations du sol sont plus importantes en profondeur et sont invisibles en surface. Un certain degré de pulvérisation est cependant atteint sur la bande labourée encore liée par les racines après son retournement total (schéma 2, fig. 16).

3. *Surfaces compactes et battantes.*

Certains sols de limons peu denses en profondeur offrent une surface compacte et battante qui présente des irrégularités dues aux plans de cisaillement. Dans ce cas, il se produit fréquemment une pulvérisation importante (schémas 3, 4 et 5, fig. 16).

4. *Sols récemment labourés.*

Les auteurs estiment qu'il est nécessaire de conférer à ces sols une certaine compacité permettant à la charrue d'accomplir les fonctions qui lui sont demandées au cours de ces essais (schéma 6, fig. 16).

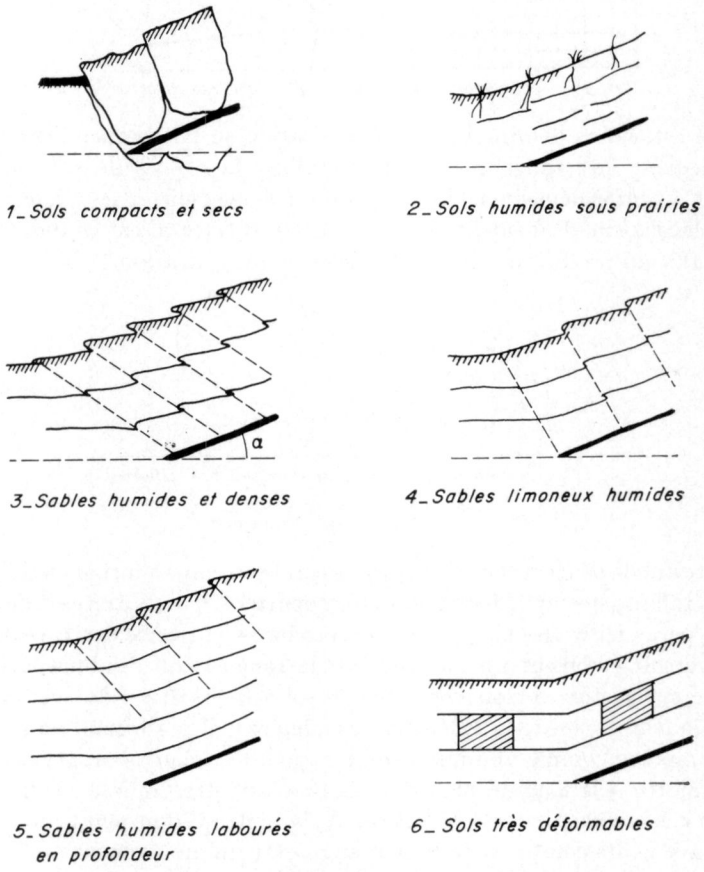



FIG. 16. — *Comportement des différents types de sols d'après* SOHNE

B. — *Description de l'action d'un versoir sur un sol donné*

Ces auteurs, avec NICHOLS (1929, 1931 *b*, 1932), KEEN (1931), KEEN et HAINES (1925) et BAVER (1956), s'accordent pour décrire qualitativement le mouvement du sol sur le versoir de la façon suivante :

— le copeau du sol, séparé par le coutre et le soc, est entraîné vers le haut mais en général les déformations qu'il subit par flexion et torsion en suivant la surface du versoir dépassent son seuil de rupture et entraînent la formation de plans de cisaillement.

Si le sol est suffisamment déformable, les particules de la partie inférieure, en

passant sur le versoir, ont une trajectoire plus longue que ceux de la partie supérieure. Le copeau se divise alors en couches qui se déplacent à des vitesses différentes, et les surfaces de cisaillement sont parallèles à la surface du versoir (fig. 17).

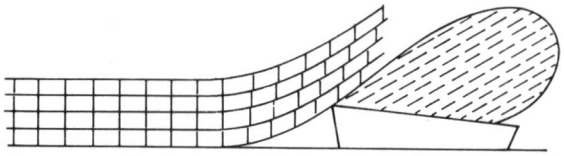


FIG. 17. — *Comportement théorique d'un sol très déformable*

Si le sol est moins déformable, la pulvérisation se fait perpendiculairement et non parallèlement aux tangentes des trajectoires. Les blocs de sol ainsi cisaillés « s'arrangent » conformément à la configuration du versoir et les plans de cisaillement se déplacent simultanément le long de cette surface. C'est ce mouvement des mottes (fig. 18) qui produit les différents types de pulvérisation.

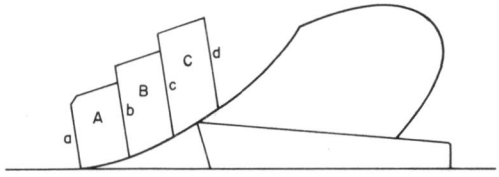



FIG. 18. — *Comportement théorique d'un sol peu déformable*
A, B, C : mottes successives
*a*, *b*, *c*, *d* : plans de glissement

La pointe du soc pénétrant dans le sol joue le rôle de coin et forme en avant du soc ce que les métallurgistes appellent une arête rapportée. Or cette arête est détruite avec une certaine périodicité. Les particules fines produites par cette destruction montent le long du versoir et créent un mouvement de rouleau qui diminue le frottement sol-métal. La surface du versoir comprime le sol à la « sortie » du soc, et quand la résistance à la coupe excède la valeur du cisaillement, il y a formation d'un bloc de sol qui se comporte comme une unité solide. Quand la charrue avance, la motte B glisse sur la motte A le long du plan *b*. Pour que la motte C glisse sur la motte B le long du plan *c* à la même vitesse que B sur A, la motte C doit avoir un mouvement égal aux mouvements combinés de A et B augmenté du mouvement de A et ainsi de suite pour D, E, etc. Alors le mouvement à travers toute la masse sur les plans de cisaillement est partout le même, mais le mouvement vers le haut se fait avec un accroissement constant de vitesse.

Il apparaît également que la force nécessaire pour cette action dépend de la pression du sol et du frottement sol-métal. Le mouvement des mottes de terre continue jusqu'à ce que la résistance du sol devienne égale ou supérieure au frottement entre sol et métal pendant la montée.

### C. — *Plans de cisaillement selon* NICHOLS *et* REED

Il a été mis ainsi en évidence l'existence de plans de cisaillement dans deux directions différentes. En fait ces deux familles existent dans tous les sols travaillés, mais l'une ou l'autre de ces familles est plus ou moins apparente. NICHOLS et REED (1934) ont appelé ces deux familles : famille primaire et famille secondaire.

1. *Plans de cisaillement primaires.*

La formation de blocs parallèles entre eux fait apparaître la première famille de plans qui, toujours selon ces auteurs, fait un angle de 45° par rapport à la direction d'avancement. Cet angle de cisaillement est constant et ces plans primaires conservent leur position relative durant le passage du sol sur le versoir.

2. *Plans de cisaillement secondaires.*

Le soc de la charrue fait environ un angle de 45° avec la direction de travail Les mottes de sol formées par les plans primaires sont soulevées progressivement à partir de la muraille sur des surfaces presque perpendiculaires à ces plans primaires. NICHOLS (1932) a montré l'existence de plans perpendiculaires aux premiers qui déterminent une zone de « pulvérisation » limitée par des lignes parallèles à la surface du versoir. Ces plans secondaires ne sont pas apparents tant que la terre n'a pas été retournée et sont mis en évidence par une marche arrière de la charrue.

Le nombre et l'importance de ces plans primaires et secondaires sont évidemment plus ou moins grands selon les caractéristiques du sol et du versoir.

## D. — *Facteurs dynamiques mis en jeu par le labour*

NICHOLS, particulièrement en 1929, a établi le tableau (tabl. 3) des variables entrant en jeu dans les réactions du sol sur le versoir. Il a ainsi mis en évidence les caractéristiques fondamentales dont certaines sont cependant liées : les propriétés

TABLEAU 3

*Paramètres mis en jeu au cours d'un labour*

| Facteurs primaires mesurables ou contrôlables | Variables du dispositif contrôlables | Propriétés dynamiques du sol mesurables | Résultantes dynamiques mesurables |
|---|---|---|---|
| Granulométrie | Nature du métal | Angle de frottement interne | Fragmentation |
| Teneur en colloïdes | Polissage<br>Surface portante | Friction | Compaction<br>Cisaillement |
| Teneur en eau<br>Densité sèche<br>Matière organique<br>Composition chimique des colloïdes | Courbure de la surface d'application de la force | Résistance à la compression<br>Cohésion<br>Adhésivité<br>Moment d'inertie | Flexion |

mécaniques du sol étudié, fonction des facteurs primaires, et les résultantes dynamiques, liées non seulement aux facteurs primaires mais aussi aux variables du dispositif. Les résultats sur l'étude des caractéristiques mécaniques des sols utilisés par NICHOLS (1932) dans ses essais de labours ont été repris par BAVER (1956) qui, afin de mieux mettre en évidence leurs variations, considère les valeurs relatives de chacune d'elles.

Les courbes ainsi obtenues indiquent notamment que dans la zone définie par l'indice de plasticité (IP = LL — LP), toutes ces caractéristiques atteignent leurs valeurs maximales. Le cisaillement cependant fait exception : NICHOLS (1929) le définit comme « le glissement du sol sur lui-même, sa valeur étant celle de la résistance interne du sol à tout mouvement de ses particules ».

### E. — *Frottement sol métal*

NICHOLS (1931 *b*) définit un coefficient de frottement cinétique $\mu'$ permettant de quantifier l'influence du frottement du sol sur le métal pendant le retournement de la terre sur le versoir. Cet auteur publie les résultats obtenus sur les essais faits avec une pièce métallique plane tirée sur une surface de sol lisse libre de tous débris végétaux. Selon la teneur en eau du sol étudié et compte tenu des variations de l'adhérence, la variation du coefficient de frottement cinétique $\mu'$ se fait en quatre phases.

*Phase A. Compression.*

Lorsque dans un sol, l'eau n'adhère pas au métal et que les forces portantes sont inférieures à la pression, c'est-à-dire lorsque le poids de la pièce glissante comprime le sol, le coefficient de frottement $\mu'$ varie avec la vitesse. Il est proportionnel à la pression et fonction de l'état et de la nature de la surface du sol. Les constatations de ces auteurs permettent de conclure que le sol n'est pas entré en plasticité et qu'il est encore en phase élastique.

*Phase B. Frottement.*

Si la force portante du sol est supérieure à la pression exercée, l'eau n'adhérant pas au métal, l'amplitude du frottement est proportionnelle à la pression totale entre les deux surfaces. La valeur de $\mu'$ dépend alors de la rugosité de la surface mais est indépendante de la vitesse de glissement.

Dans ce cas encore, il est permis de conclure que le sol est dans un état élastique, soumis à de faibles efforts de compaction.

*Phase C. Adhérence.*

Lorsque la teneur en eau est suffisamment grande pour qu'il y ait adhérence du sol sur la surface de glissement, sans être toutefois excessive de façon à ne pas avoir de film d'eau sur celle-ci, $\mu'$ est fonction de la vitesse, de l'aire de contact, de la pression, de la tension superficielle du film d'eau, de la teneur en eau, de la température et de la viscosité du sol. En outre, $\mu'$ dépend de l'état et de la nature du métal.

*Phase D. Lubrification.*

Si la teneur en eau augmente de façon telle que le rôle lubrificateur de l'eau apparaisse, $\mu'$ est alors fonction de la pression, de la vitesse, de la quantité d'eau présente et de la viscosité de la solution. Il dépend enfin de la nature de la surface et du matériau utilisé.

Cette phase D présente les caractéristiques d'un sol à l'état « liquide ». La teneur en eau est telle que les efforts sont amortis par l'eau à l'état libre entre les grains du matériau.

Il est intéressant de noter que pour atténuer le frottement du sol sur le métal, de nombreuses solutions ont été proposées. Citons pour mémoire la méthode élec-

trique de CROWTHER et HAINES (1924). Un courant électrique établi dans un sol artificiel au cours d'essais en laboratoire, a permis de réduire considérablement le frottement entre la surface métallique et la bande labourée. Des essais d'applications au champ ont montré que la force de traction mise en jeu était réduite en établissant un courant entre le coutre et le versoir. L'ampleur de cette réduction n'était cependant pas suffisante par rapport à la quantité d'énergie dépensée pour en avoir une application pratique immédiate.

### F. — *Conclusion*

Toutes ces observations qualitatives de NICHOLS permettent de réaliser la complexité des phénomènes et mettent au grand jour tout l'éventail des travaux nécessaires pour arriver à dominer tous les facteurs mis en cause.

Au cours de son déplacement sur le versoir, le matériau entre donc en plasticité comme le montrent les différentes observations de NICHOLS. Ce mouvement et les conséquences qu'il entraîne évoquent avec une certaine analogie la théorie de la plasticité appliquée aux murs de soutènement.

Cependant, l'aspect tridimensionnel de l'étude du champ des contraintes n'a jamais été abordé en utilisant les théories de la mécanique des sols du fait de la complexité des déformations et des difficultés d'observations attachées à toute étude dans l'espace à trois dimensions. De nombreux travaux ont simplifié les données en réduisant à deux les dimensions de travail. La terre est retournée dans un plan vertical par des lames planes, inclinées ou non. Une certaine analogie existe aussi entre ces essais et le travail des métaux ou du bois, par un outil ayant un rôle de rabot. Si le travail du bois est *a priori* semblable, cette similitude est très rapidement limitée à cause de l'anisotropie du matériau. Celle-ci, en effet, crée des directions préférentielles dans la répartition des contraintes ou des déformations. Le travail des métaux, par contre, semble présenter des analogies plus profondes, car les critères d'écoulement sont les mêmes (du type de Mises par exemple) pour des valeurs différentes des grandeurs caractéristiques.

BLANPIN (1955) et BOUILLET (1964) rappellent qu'au cours de l'usinage d'une pièce métallique, il y a formation d'un copeau « par processus de cisaillement et d'écoulement plastique dans une zone étroite, sensiblement plane, joignant l'arête tranchante de la surface de la pièce usinée, en formant un angle aigu avec la trajectoire de l'outil ». Ces auteurs rapportent et résument les divers travaux effectués en vue d'élaborer une étude analytique de la répartition des contraintes selon la loi plastique choisie.

Ainsi PIISPANEN (1937 et 1948), MERCHANT et ERNIT (1940) et MERCHANT (1945) supposent que le processus de déformation plastique se fait avec le minimum de travail de la part des forces mises en jeu. Par contre, LEE et SCHAEFFER (1951) supposent que le matériau usiné est tel que le plan de cisaillement se crée suivant une direction de cisaillement maximal. HUCKS (1951) suppose que l'état de contraintes dans le copeau est tel que la contrainte normale sur un plan normal à la surface d'attaque est nulle. Enfin SHAW, COOK et FINNIE (1953) se rapprochent encore du comportement réel du matériau et proposent une répartition des contraintes très satisfaisante. Il convient de remarquer que chacune de ces théories a une résonance pour un mode de travail particulier et chacune entraîne une orientation particulière des surfaces de cisaillement.

Toutes ces théories ne sont évidemment pas directement applicables à l'étude du labour, mais devraient servir de base fondamentale à une première ébauche faite dans l'espace à deux dimensions où le déport latéral du versoir a été supprimé. En vue d'une meilleure compréhension de l'écoulement du sol proprement dit sur une surface bidimensionnelle, il est nécessaire de rappeler les études déjà effectuées sur ce sujet et qui utilisent les résultats de la théorie de Coulomb.

## II. — Essai d'application de la théorie de Coulomb

Payne (1956) comme Siemens *et al.* (1965), utilise les données classiques de la mécanique des sols en considérant les zones active et passive de Rankine. C'est pourquoi, avant d'aborder les deux études, il est nécessaire de rappeler les résultats de Coulomb, dont Terzaghi et Peck (1961) ont développé la théorie pour un sol subissant une poussée latérale (méthode de Culman). Culman considère une masse de sol limitée par deux plans, *a c* horizontal (fig. 19) libre de toute contrainte et *ab* rugueux,

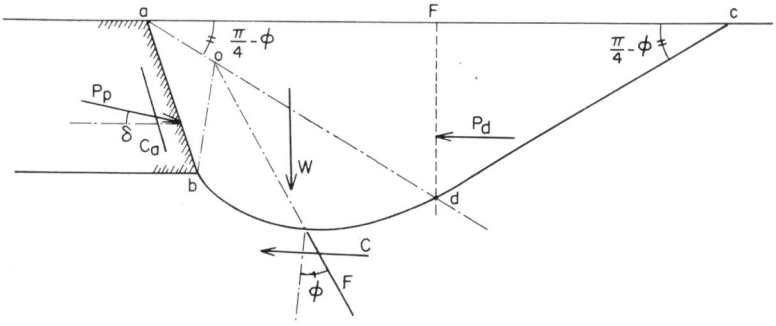



Fig. 19. — *Comportement d'un sol en butée*

d'angle de frottement δ. La ligne de glissement se compose de deux parties, l'une rectiligne (*dc*) et l'autre courbe (*bd*). Culman suppose en outre que la portion de sol comprise à l'intérieur du triangle isocèle (*adc*) est dans l'état passif de Rankine. L'angle *acd* est donc égal à $45^{o}$-φ, où φ est l'angle de frottement interne du matériau. L'arc de courbe *bd* est un arc de spirale logarithmique, les contraintes de cisaillement le long de *d*F sont nulles et la poussée $P_a$ sur cette section est horizontale. La masse de sol *abd*F est sollicitée par :

— son poids W ;
— la poussée $P_a$ ;
— la résultante C des forces de cohésion le long de *bd* ;
— l'adhérence $C_a$ le long de *ab* ;
— la résultante F des contraintes normale et tangentielle le long de *bd* ;
— la butée $P_P$.

La ligne de glissement est alors définie en déterminant les paramètres de la spirale logarithmique de façon que cet ensemble de forces soit en équilibre.

### A. — *Étude de* Payne

Payne (1956) constate dans son introduction « qu'aucune théorie sur le comportement d'un sol agricole sous l'action d'un équipage mobile n'est valable pour l'utilisateur des engins de travail du sol qui a toujours à relier l'expérience et l'intuition.

Les études faites pour les véhicules tout-terrain ont mis cependant en évidence la façon dont les théories sur le comportement rhéologique du sol sont en partie directement applicables aux conditions imposées par l'agriculture. »

En effet, il convient de noter que les agronomes entre les années 1923 et 1953 se sont plus particulièrement préoccupés des propriétés physiques du sol au point de vue de leurs effets sur les outils. Leurs travaux donnèrent de nombreux renseignements sur les mesures des propriétés mécaniques du sol, soit au laboratoire, tels KEEN et SCOTT, BLAIR (1929), SCOTT-BLAIR (1937), SCOTT-BLAIR et YATES (1932), NICHOLS (1931 et 1932), NICHOLS et KUMMER (1932), soit au champ, tels KEEN et HAINES (1925) et NICHOLS et REED (1934).

L'étude de PAYNE se situe dans le cadre suivant :

— la forme géométrique de l'outil étudié est simple en vue de mettre en évidence les principes applicables à tous les sols ;

— ces outils sont des plaques planes rabotant ou poussant le sol devant elles ;

— la force de traction et le volume de la partie soulevée sont étudiés simultanément ;

— ces résultats sont comparés aux mesures des contraintes du sol au laboratoire dans des conditions aussi voisines que possible du cisaillement.

*Expérience* : En premier lieu, PAYNE a effectué des essais en vue d'observer qualitativement le comportement d'un sol soumis à l'action d'un outil vertical étroit. Ces essais ont conduit à l'élaboration de certaines hypothèses basées sur un modèle de clivage pour expliquer les efforts de traction nécessaires et le volume de la partie soulevée en accord avec les théories de RANKINE. Enfin, la mesure des paramètres du sol a permis une comparaison des essais avec les résultats donnés par la théorie initiale.

Les conclusions de PAYNE sont les suivantes :

1. Le mouvement de l'outil plan et vertical crée devant celui-ci un bloc de sol en forme de coin, limité par deux plans verticaux et par une surface légèrement gauche (fig. 20). L'inclinaison de cette surface de glissement dépend du frottement sol-métal et de l'angle de frottement interne du sol. Le coin se déplace en avant de l'outil mais en même temps glisse vers le haut.

2. Ce coin se comporte comme un couteau fendant le sol autour de lui en deux parties qu'il pousse vers le haut et sur les côtés pour se frayer un passage. Ces portions de sol ainsi séparées sont déplacées et isolées du reste de la masse par un déplacement le long des surfaces de glissement. Celles-ci prennent naissance au bas du coin et apparaissent au niveau du sol en forme de croissant entourant l'outil et le coin (fig. 20).

3. Un mouvement continu de l'outil produit une série de compressions et de fissures à l'intérieur du sol.

4. La distance entre l'outil et la fissure en forme de croissant est proportionnelle à la profondeur.

5. La force de traction est fonction de la profondeur. Cette fonction a deux composantes fondamentales, l'une proportionnelle à la profondeur et l'autre proportionnelle au carré de celle-ci.

6. Les outils suffisamment larges pour amener le sol à l'état plastique sont tels que la distance entre l'outil et la fissure en forme de croissant varie linéairement avec la largeur de la plaque.

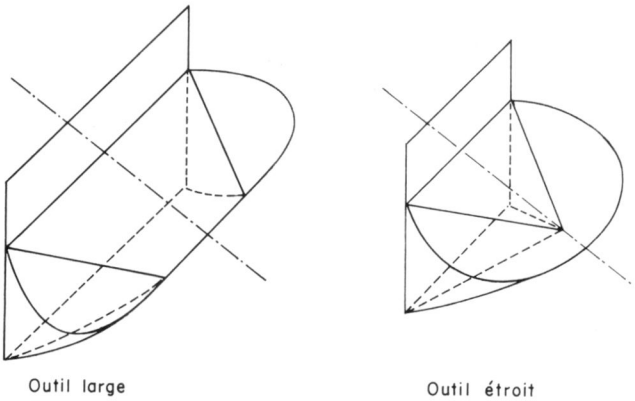



FIG. 20. — *Étude de* PAYNE. *Coin de terre soulevé par déplacement d'un outil plan vertical*

7. Dans les mêmes conditions, les dimensions radiales du soulèvement peuvent être déduites des paramètres du sol, tels que la cohésion, l'angle de frottement interne, l'adhérence et la densité apparente.

8. Ces mêmes paramètres permettent de calculer également la plage de variations de la force de traction.

9. L'effort de traction varie également de façon linéaire avec la cohésion et le volume de la partie soulevée.

La théorie de RANKINE permet de déterminer la pression du sol sur la paroi plane. Pour une paroi infiniment large et parfaitement lisse, appuyée sur une terre sans cohésion, cette poussée est :

$$P'_p = \frac{1}{2}\,\gamma\, l^2 \mathrm{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$$

où

$\gamma$ = poids spécifique
$l$ = hauteur de la paroi

Cette poussée est appelée par RANKINE « pression passive des terres ».

Si le sol possède une cohésion C, cette cohésion crée une pression supplémentaire de valeur :

$$P'' = 2\, Cl\, \mathrm{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$$

De ce fait, la pression totale, « pression passive des terres » est :

$$P_p = P'_p + P''_p$$

Dans la pratique, les essais de PAYNE se rapprochent de ces résultats dans la mesure où la paroi est rendue très lisse et le sol utilisé est un sable pur. Si l'angle de frottement sol-métal est inférieur au tiers de la valeur de l'angle de cisaillement et si le sable est sec, l'effort de traction par unité de largeur est proche de $P'_p$. Par contre, si le sable est humide, la force de traction par unité de largeur est voisine de $P_p$.

### B. — *Étude de* SIEMENS, WEBER *et* THORNBURN

Partant des résultats des travaux de PAYNE et se basant sur les théories du mur de soutènement, SIEMENS, WEBER et THORNBURN (1965) ont considéré un outil plan, incliné par rapport à la verticale. Par des essais, ils ont déterminé la surface de glissement et les forces mises en jeu. Ces résultats sont ensuite comparés à ceux obtenus en se basant uniquement sur des considérations théoriques.

Les auteurs constatent que la théorie du mur de soutènement dont la surface est rugueuse n'est pas applicable aux outils inclinés de moins de 70° sur le plan horizontal. Le bord inférieur de l'outil en effet a tendance à rejeter le centre de la spirale logarithmique dont la détermination est alors difficile. Pour calculer, par la théorie de plasticité, les forces agissant sur le sol avec un tel outil, SIEMENS suppose que la surface de cisaillement est inclinée de $45° - \frac{\varphi}{2}$, c'est-à-dire, que la contrainte principale mineure est verticale dans tout le sol. SIEMENS suppose encore que les surfaces de glissement séparant deux blocs ne remanient pas le sol.

Il détermine la valeur de P (fig. 21) en écrivant l'équilibre de l'ensemble des forces mises en jeu.

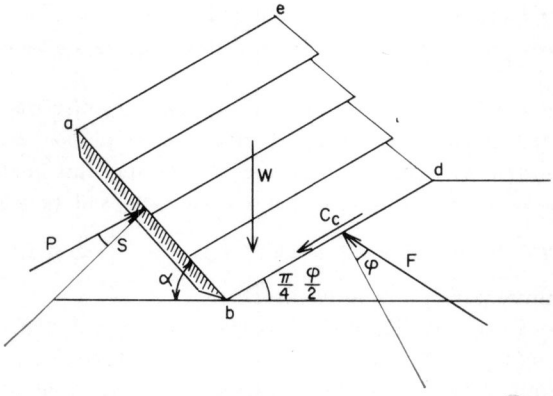



FIG. 21. — *Étude de* SIEMENS. *Équilibre des forces s'exerçant sur un copeau de terre*

La figure 19 (le mur étant remplacé par l'outil) donne les positions respectives du sol et de l'outil quand le déplacement de celui-ci est suffisant pour créer la première fissure. La figure 22 donne les positions respectives des mottes de terre pour un déplacement tel que deux surfaces de glissement soient créées et que la troisième vienne de prendre naissance. Ces fissurations successives et périodiques donnent à la force P une allure ondulatoire. La valeur maximale de cette force n'est pas supérieure à celle qui se produirait si le sol était cisaillé en une seule fois.

En général, les blocs de terre s'élèvent parallèlement à la surface de l'outil, créant des vides à leur voisinage, mais l'auteur constate que si la contrainte de compression créée est suffisamment grande, il arrive que ces vides soient bouchés et que les surfaces de cisaillement soient indéterminées au voisinage de l'outil.

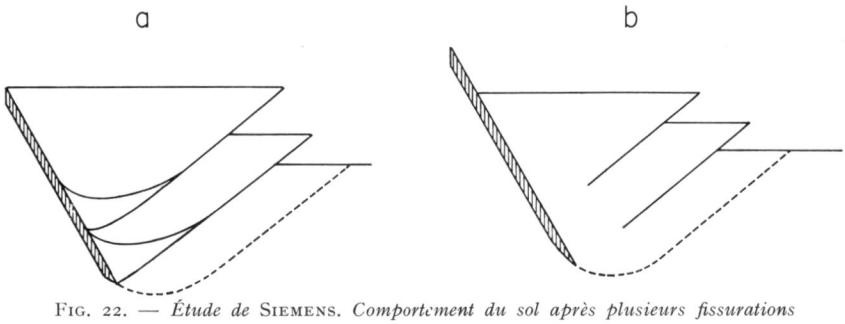



FIG. 22. — *Étude de* SIEMENS. *Comportement du sol après plusieurs fissurations*
*a*) Deux surfaces de glissement
*b*) Naissance de la troisième

1. *Essais et interprétation.*

A l'aide d'un outil miniature et d'un sol remanié, mélangé à un pourcentage d'huile constant pour lui assurer une stabilité de longue durée, SIEMENS détermine les surfaces de glissement pour des outils ayant des angles d'attaque différents.

L'auteur constate que l'allure des surfaces est spécifique de l'outil, mais change avec son inclinaison.

Les outils dont l'angle d'attaque est compris entre 15° et 60° sont la cause de surfaces de glissement planes, inclinées et passant en dessous de l'extrémité d'attaque de l'outil.

Les outils dont l'angle d'attaque est compris entre 70° et 90° sont la cause de surfaces de glissement courbes au voisinage de l'outil et planes, mais inclinées, loin de l'outil. Pour chaque essai, l'auteur a mesuré l'angle que fait la surface plane avec le plan horizontal et trouve comme valeur moyenne 31°1, valeur très voisine de celle établie par la théorie du mur de soutènement soit $\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$ où $\varphi$ est l'angle de frottement interne déterminé par des mesures directes.

Les déformations du matériau créées par le déplacement d'un outil vertical sont représentées sur la figure 23. SIEMENS remarque que les lignes initialement verticales 5 et 6 (fig. 23 A) sont déformées alors que les lignes 10 et 11 ne le sont pas encore. La formation de la surface de glissement n'est donc pas instantanée. En outre, la ligne E subit une déformation au passage de l'outil. Ce dernier phénomène n'apparaît pas avec un outil incliné comme le montre la figure 24.

En portant sur un même graphique (fig. 25) les positions respectives des points repères, SIEMENS est amené aux conclusions suivantes :

— aucun point du sol ne se déplace parallèlement à la surface de l'outil vertical ;
— alors que la surface de glissement est formée, les points près de la pointe de l'outil se déplacent parallèlement à la direction d'avancement ;
— le sol au voisinage de la pointe de l'outil se « colle » contre la paroi et forme un coin triangulaire. L'auteur ajoute que la formation de ce triangle ne se produit que pour des outils inclinés de 70° à 90° par rapport au plan horizontal ;
— les surfaces de glissement ne sont jamais visibles au voisinage de l'outil pour des angles d'inclinaison inférieurs à 30° ;

— il est possible de déterminer la forme et la longueur de la ligne de glissement, et ainsi de la comparer avec celle obtenue par la théorie du mur de soutènement. L'auteur constate que les outils ayant une inclinaison inférieure à 30° ne définissent

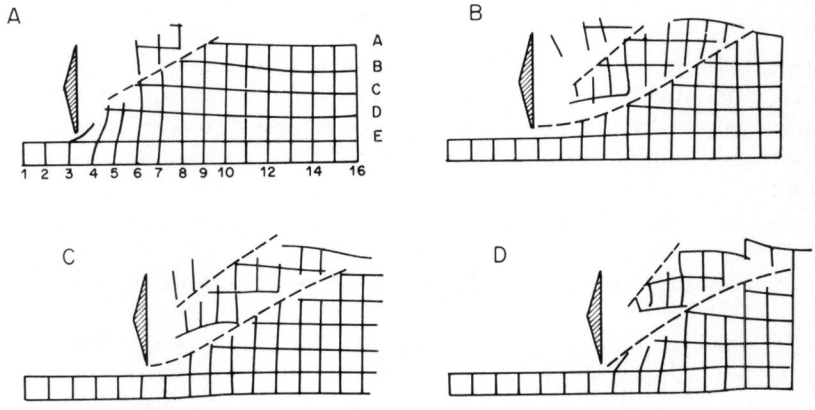



FIG. 23. — *Étude de* SIEMENS. *Action d'un outil vertical*

A, B C, D : Étapes successives de l'outil

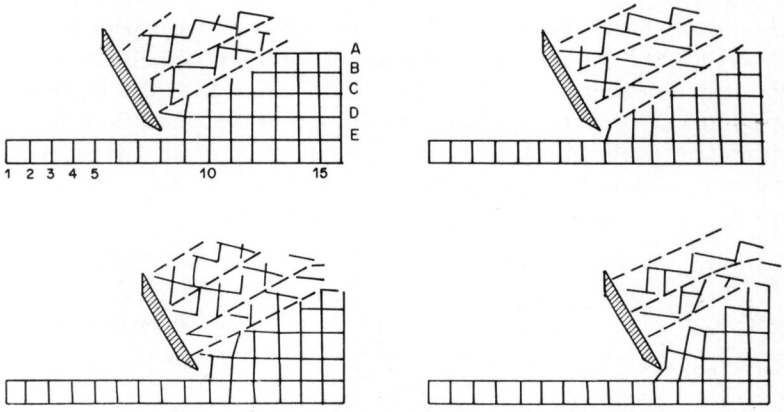



FIG. 24. — *Étude de* SIEMENS. *Action d'un outil incliné*

A, B, C, D : Étapes successives de l'outil

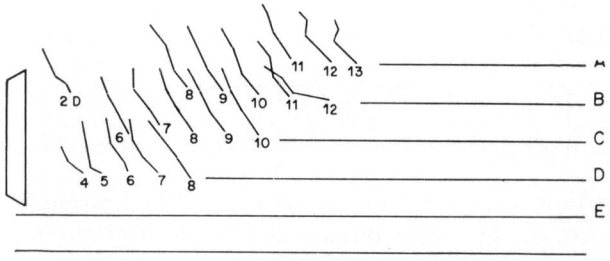



FIG. 25. — *Étude de* SIEMENS. *Trajectoires relatives des particules*

pas une ligne suffisamment nette pour cette comparaison. Les outils dont l'angle est compris entre 30° et 70° déterminent des lignes en parfait accord avec les lignes théoriques, mais les outils dont l'angle est supérieur à 70° créent une ligne de glissement dont la longueur est légèrement plus grande que celle donnée par la théorie.

2. *Forces mises en jeu.*

Les auteurs ont mesuré les forces intervenant au cours du déplacement des outils. La résultante P de ces forces a des composantes horizontale et verticale dont les amplitudes variables sont directement liées à la formation périodique des surfaces de glissement. L'auteur explique le comportement de ces composantes de la façon suivante :

— $F_z$ passe par un maximum lorsque la surface de glissement est sur le point de se former ;

— $F_z$ passe par un minimum lorsque la partie cisaillée du sol est totalement formée ;

— les valeurs de la composante verticale sont toujours très faibles mais ses variations sont identiques à celles de $F_z$ ;

— l'angle $\beta$ que fait la force P avec la normale au plan de l'outil est donc variable au cours du déplacement. Mais, constatent les auteurs, il varie également avec l'angle qui caractérise l'inclinaison de l'outil, variation qui est éliminée en supprimant les effets de bord.

En définitive, l'auteur compare la valeur des forces mesurées au cours des essais à celle des forces définies par la théorie du mur de soutènement pour les outils ayant un angle supérieur à 70° ou par « la théorie du corps en équilibre » pour les outils ayant un angle inférieur à 70°. Les courbes obtenues à des vitesses différentes ont la même allure que la courbe théorique, mais donnent systématiquement des valeurs plus petites. Cependant, constate SIEMENS, le minimum de chacune correspond à la même valeur de l'angle d'inclinaison de l'outil, soit 25° (fig. 26). L'auteur estime que

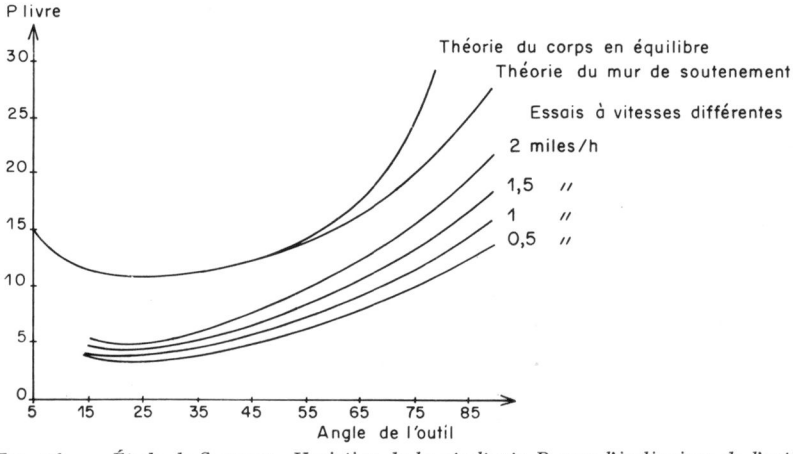



FIG. 26. — *Étude de* SIEMENS. *Variation de la résultante P avec l'inclinaison de l'outil*

cet écart systématique entre les deux valeurs est dû à la pression interstitielle développée dans le sol et au fait que les surfaces de glissement ne se forment pas de façon instantanée.

Dans les essais effectués par l'auteur pour déterminer la cohésion, la valeur de la pression interstitielle a été considérée comme négligeable. Or au cours des essais de labour cette pression n'est pas entièrement dissipée au moment de l'apparition des surfaces de cisaillement. Ainsi, la valeur de la résistance au cisaillement du sol labouré est diminuée et il en est de même de la valeur de P mesurée.

## III. — Conclusions

Les déformations mises en évidence au chapitre II à l'aide des trajectoires ont rendu nécessaires un changement d'orientation et l'utilisation des théories de la mécanique des milieux continus. Ces déformations sont suffisamment grandes pour créer des plans de cisaillement et pour confirmer que le matériau est à l'état plastique.

La théorie de la plasticité est très riche en conséquences car elle permet de faire un parallélisme entre l'usinage des métaux, les murs de soutènement et l'action d'un outil plan sur un sol.

Dans le cas des métaux, le critère d'écoulement utilisé est celui de Misès : supposer que les plans de glissement se créent suivant les directions de cisaillement maximal revient à supposer que le métal a le même comportement qu'une argile dont l'angle de frottement interne serait nul. La nature même du métal lui donne un comportement particulier au cours de son usinage en orientant ses cristaux selon une direction privilégiée.

La répartition des contraintes a, en premier lieu, été supposée homogène dans la zone plastique mais cette hypothèse a semblé peu conforme aux essais. Une nouvelle direction de recherche a été prise avec un champ de contraintes non homogènes, l'expérience ayant montré l'existence d'un faisceau de Prandtl dû à la présence de l'arête rapportée. Enfin, la prise en considération de l'influence variable de la rugosité de l'outil a permis une meilleure approche de la compréhension théorique des essais.

Cependant, la détermination du champ de contraintes est faite à l'état statique alors que le comportement du matériau ne peut être entièrement connu que si le champ des vitesses est également déterminé. Cette étude n'a été entreprise par aucun auteur, mais il semble qu'elle pourrait être faite en considérant un champ présentant une discontinuité cinématique de Pragger.

Dans le cas des murs de soutènement, la loi d'écoulement est celle de Coulomb caractérisant un sol par sa cohésion et son angle de frottement interne.

Toutes ces études ont été faites avec des outils plans, et la première extrapolation qui s'impose est d'aborder le comportement du matériau travaillé par un outil dont la surface est courbe, en utilisant éventuellement les résultats précédemment acquis.

Le travail d'une charrue, ou celui d'une niveleuse, se situe dans un espace à trois dimensions. Il est donc évident que la recherche entreprise ne peut se limiter à un mouvement bidimensionnel. Ainsi, il est nécessaire d'envisager pour un proche avenir des essais permettant d'élaborer une théorie des champs de contraintes tridimensionnels. Cette étude ne sera complète que si elle est elle-même suivie d'une étude du champ des vitesses.

## CONCLUSION

Par cette mise au point, apparaît la possibilité de considérer le mouvement du matériau en faisant appel à ses propriétés mécaniques. Certains auteurs ne se sont placés que sur un plan descriptif (SOHNE et NICHOLS) mais leurs études ont permis de faire mieux comprendre le comportement du matériau et de faire ressortir qualitativement les paramètres entrant en jeu dans les divers types de labours. D'autres auteurs ont tenté d'analyser le comportement global du sol (PAYNE) à l'aide des théories élaborées en Mécanique. Les résultats obtenus sont en bonne corrélation avec les mesures expérimentales de ces auteurs dont l'attitude est sans aucun doute celle qui doit permettre de relier les observations qualitatives aux théories fondamentales.

Les surfaces de glissement observées par les premiers et mesurées par les seconds attestent de la cohérence des résultats et du caractère complémentaire de ces deux attitudes. Il est cependant nécessaire de constater que les paramètres dynamiques ne sont pas considérés ni par les uns, ni par les autres. Ainsi, la répartition des contraintes n'a jamais été étudiée, alors qu'elle est indispensable à une compréhension totale du phénomène. C'est en effet un point essentiel car elle fait intervenir les réactions dynamiques du sol en fonction du temps dont la connaissance permettrait de prévoir la formation des mottes.

Une observation plus rigoureuse du phénomène et une étude plus approfondie du processus de déformation doivent donner la possibilité de formuler une ou plusieurs hypothèses sur les types mécaniques du matériau donc sur ses critères d'écoulement. De là, une théorie plus élaborée permettrait d'établir non seulement les équations des surfaces de glissement, mais aussi les lois de déformations du matériau. Ces résultats acquis sur des sols « parfaits » pourront alors être extrapolés expérimentalement aux sols réels pour des applications immédiates : technique de travail du sol et amélioration du rendement agronomique des outils.

Par le fait même que le matériau ait plusieurs comportements selon ses caractéristiques granulométriques, la nécessité de considérer un certain nombre de critères d'écoulement est l'une des premières servitudes imposée aux chercheurs.

Cet aspect de la mécanique théorique ne doit pas faire oublier les autres problèmes posés aux agriculteurs tels le retournement de la terre, son dégagement du versoir (problème des courbes limites), son mélange avec les matières organiques et l'enfouissement de ces dernières. Dans quelle mesure ces divers problèmes pourront-ils être résolus en termes de mécanique ?

A ces considérations, d'ordre purement agronomique, viennent s'ajouter des données économiques qui peuvent s'exprimer en termes de consommation d'énergie. Une grande proportion de l'énergie fournie par le tracteur est en effet dépensée par le patinage des pneus. Une recherche de la solution la plus économique est donc un complément indispensable aux études entreprises dans la connaissance de la terre et de l'action des versoirs.

*Reçu pour publication en décembre 1969.*

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé dans la réalisation de ce travail.

M. M. les professeurs KRAVTCHENKO, HÉNIN, SANTON et BIAREZ qui ont bien voulu, après m'avoir accueilli dans leurs laboratoires, composer le Jury de ma thèse soutenue à Grenoble et dont sont extraits ces articles ; M. SIRIEYS, maître de conférences à la Faculté de Toulouse, qui a bien voulu me faire profiter de ses critiques et de ses conseils; M. DALLEINNE, ingénieur de l'APEP, qui m'a fait connaître les divers types de versoirs de façon concrète; M. LACLIE, enfin, qui a contribué, par son aide dévouée, à la résolution des problèmes techniques rencontrés à chaque étape.

Que tous trouvent ici l'expression de ma plus profonde reconnaissance.

## SUMMARY

### CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE ACTION OF A PLOUGH HOULD-BOARD ON THE SOIL

### II. — BEHAVIOUR OF SOIL WORKED BY A PLOUGH MOULD-BOARD

In a previous article, a classification of mould-boards was proposed. A number of characteristic measurements were thus defined.

Since the tool is known, this second part makes use of some theories that draw closer to the actual behaviour of the material on the mould-board. However each of them is an interesting stage since it has exploitable conclusions. These speculations demonstrate the need of using theories about the mechanics of deformable media to explain the existence of mounds and lines of slipping.

Thus a new direction must be given, as much in the field as in the laboratory, to studies carried out on the turning over of the soil layer.

## ZUSAMMENFASSUNG

### BEITRAG ZUR UNTERSUCHUNG EINES MITTELS PFLUG-STREICHBLECHES BEARBEITETEN BODENS

In einem ersten Teile wurde eine Klassifikation der verschiedenen Streichbleche vorgeschlagen. Auf diese Weise wurden einige karakteristischen Grössen bestimmt.

Da das Gerät jetzt gut bekannt ist, wird im Laufe dieses zweiten Teiles eine bestimmte Zahl von Hypothesen benutzt, die sich mehr und mehr mit dem wirklichen Verhalten des Bodens auf das Streichblech befassen. Jede einzelne Hypothese stellt jedoch infolge ihrer benutzbaren Folgerungen einen interessanten Schritt dar. Diese Hypothesen unterstreichen die Notwendigkeit die Theorien der Mechanik der deformierbaren Böden anzuwenden, um das Auftreten von Schollen und Rutschlinien zu erklären.

Es muss demzufolge eine neue Orientierung den Untersuchungen, sowohl auf dem Feld, als auch im Laboratorium, gegeben werden, um die Umkehrung des Bodensstreifens zu studieren.

## РЕЗЮМЕ

*Изучение действия отвала плуга на почву.*

*2-ая часть : Изучение поведения почвы обрабатываемой отвалом.*

А. ФОР.

В первой части данного труда автор предложил классификацию отвалов, благодаря которой возможно определение некоторых характерных величин.

Во второй части предлагается несколько гипотез, все более и более приближающихся к реальному поведению почвы на отвале. Нужно отметить однако, что каждая из предлагающихся гипотез представляет отдельный интересный этап, в виду возможности разработки ее последствий. Все рассматриваемые гипотезы выявляют необходимость применения теорий механики деформируюшейся среды для об'яснения существования комков и линий скольжения.

Автор считает что необходимо таким образом дать новую ориентацию как полевым так и лабораторным опытам по изучению переворачивания почвенного-пласта.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BARRET F. M., 1967. A helicoïdal design for plough mouldboards. *J. Agric. Eng. Res.*, **12**, 3, 178-183.

BAVER L. D., 1956. *Soils physics.* John Wiley and Sons, Ed. New York, 489 pp.

BLANPIN E., 1955. *Théorie et pratique des outils de coupe.* Eyrolles éd.

BOUILLET M., 1964. *La coupe des métaux.* I. Dunod éd.

CROWTHER E. M., HAINES W. B., 1924. An electric method for the reduction of draught in ploughing. *J. Agric. Sci.*, **14**, 221-231.

DALLEINNE E., 1962. Notes pour le siège nº 904, 1228.

FEUERLEIN W., 1966. Characterization of good ploughing. *Proc. Int. Conf. on Characterization Problems in soil tillage*, 241-250.

FAURE A., 1969. Contribution à l'étude de l'action d'un versoir sur le sol. Première partie : géométrie des versoirs. Classification. *Ann. agron.*, **20**, 565-595.

HÉNIN S., FEODOROFF A., GRAS R., MONNIER G., 1960. *Le profil cultural.* Éd. des Ingénieurs agricoles Paris, 319 pp.

HUCKS H., 1951. *Plastizitätsmechanische Grundlagen und Kerngrössen der Zerpannung.* Dr. Ing. Dissertation Technische Hochshule, Aix-La-Chapelle.

KEEN B. A., 1931. *The physical properties of soils.* Longmans, Green and Co., Ed. London, 380 pp.

KEEN B. A., HAINES W. B., 1925. Studies in soil cultivation. *J. agric. Sci.*, **15**, 375-406.

KEEN B. A., SCOTT BLAIR G. W., 1929. Plastometric studies of soil and clay pastes. *J. Agric. Sci.*, **19**, 684 pp.

LEE F. H., SCHAEFFER B. W., 1951. The theory of plasticity applied to a problem of machining. *J. appl. Mechanics*, **18**, 4, 405-413.

MERCHANT M. E., 1945. Mechanism of the metal cutting process. *J. appl. Phys.*, **16**, 267-275.

MERCHANT M. E., ERNST, 1940. *Clip formation, friction and surface finish.* The Cincinnati Milling Mach. Co.

NICHOLS M. L., 1929. Methods of research in soils dynamics as applied to implements design. *Alabama Agric. Exp. Stn. Bull.*, 229.

NICHOLS M. L., 1931 *b*. The dynamic properties of soil. II. Soil and metal friction. *Agric. Eng.* **12**, 321-324.

NICHOLS M. L., 1932. The dynamic properties of soil. III. Shear values of uncemented soils. *Agric. Eng.*, **13**, 201-204.

NICHOLS M. L., KUMMER T. H., 1932. A method of Analysis of Plow Muldboard Design Based on Dynamics Properties of Soil. *J. Ann. Soc. Agric. Eng.*, **13**, 11.

NICHOLS M. L., REED I. F., 1934. Soil dynamics. VI. Physical reactions of soils to muldboard surfaces. *Agric. Eng.*, **15**, 187-190.

O'CALLAGHAN J. R., MAC COY J. B., 1963. Actions exercées sur le sol par les versoirs de charrue. *J. agric. Eng. Res.*, **10**, 1, 23-35.

PAYNE P. C. J., 1956. The relationship between the mechanical properties of soil and the performance of simple cultivation implements. *J. agric. Eng. Res.*, **1**, 23-50.

PIISPANEN V., 1937. Lastunmostumisen teoriaa. *Teknillinen aikakanslehti*, **27**, 315.

PIISPANEN V., 1948. Theory of deformation of metal chip. *J. appl. Phys.*, **19**, 376.

SCOTT BLAIR G. W., 1937. A new laboratory method for measuring the effects of land amelioration processes. *Transl.6 th Comm. Int. Soc. Soil Sci.* B, 417-425.

SCOTT BLAIR G. W., YATES F., 1932. The effect of climatic variations on the plasticity of soil. *J. Agric. Sci.*, **22**, 639-644.

SHAW M. C., COOK N. H., FINNIE I., 1953. The shear angle relationship in metal cutting. *Transl. A. S. M. E.*, 273-288.

SIEMENS J. C., THORNBURN T. H., WEBER J. A., 1965. Mechanics of soil as influenced by model tillage tools. *Transactions of the A. S. A. E.*, **8**, 1, 1-7.

SOHNE W. H., 1966. Characterization of tillage tools. *Proc. Int. Conf. on Characterization Problems in soil tillage*, 31-48.

TERZAGHI K., PECK R. B., 1961. *Mécanique des sols appliqués aux Travaux Publics et au Bâtiment.* Dunod éd., 565 pp.

WHITE E. A., 1918. A study of the plow bottom and its action upon the furrow slice. *J. Agric. Res.*, **12**, 149-182.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (2), 197-210.

# PROPOSITIONS NOUVELLES RELATIVES AU PROBLÈME DE L'AZOTE ORGANIQUE DANS UN SOL EN ÉQUILIBRE AZOTÉ

R. MOREL

*Laboratoire de Recherches de la Chaire de Physico-Chimie et Science du Sol,*
*École nationale supérieure agronomique, 78 - Grignon*
*Institut national de la Recherche agronomique*

## RÉSUMÉ

Dans un précédent mémoire, nous avons établi, pour un modèle représentant un sol en équilibre azoté, une relation exprimant la quantité totale d'azote par unité de surface ; cette relation peut se mettre sous la forme :

$$N = \frac{O + \omega M}{\alpha(1 - \omega)} \qquad (1)$$

O et M indiquant les quantités respectives d'azote organique et minéral apportées au sol et $\alpha$ le taux annuel réel de minéralisation de l'azote organique ; le paramètre $\omega$ a pour valeur $\frac{\beta}{\alpha}$, $\beta$ étant par rapport à la quantité d'azote organique total, le taux annuel de réorganisation de l'azote minéralisé.

Si des changements surviennent dans le traitement du sol, le taux d'azote organique se modifie ; par application de la relation (1), le sens de cette modification peut être raisonnablement prévu dans la mesure où il est possible de préjuger des variations respectives de $\alpha$ et de $\omega$ engendrées par les conditions nouvelles auxquelles se trouve soumis le sol.

La relation (1) permet aussi d'interpréter des faits expérimentaux ; il devient par exemple aisé d'expliquer la diminution rapide du taux d'azote organique, consécutive à la suppression des cultures, dans un sol recevant cependant des apports substantiels d'azote minéral et d'azote organique.

La relation (1) peut être mise sous la forme $N\gamma = O + \omega M$ (2) expression dans laquelle $\gamma$, qui a pour valeur $\alpha - \beta$, représente le taux net annuel de minéralisation. $N\gamma$ indique la perte annuelle d'azote organique et par conséquent la quantité d'azote à fournir au sol pour le maintenir en équilibre azoté. La relation (2) permet ainsi d'aborder le problème de l'entretien du niveau d'azote organique du sol en tenant compte des quantités d'azote minéral apportées.

## INTRODUCTION

Nous avons établi, dans un précédent mémoire (MOREL, 1969), une relation exprimant, pour un sol en équilibre azoté, la quantité d'azote organique du sol en fonction des apports d'azote organique et minéral d'une part, des taux de minéralisation réel et net d'autre part.

Considérons une unité de temps suffisamment longue, l'année moyenne d'une rotation, par exemple, et désignons par :

N, la quantité d'azote organique du sol en équilibre telle qu'elle sera précisée ci-après,

M, l'apport annuel d'azote minéral,

O, l'apport annuel d'azote organique,

$\alpha$ et $\gamma$, les taux réel et net de minéralisation de l'azote organique du sol.

Ces deux taux sont reliés par la relation :

$\gamma = \alpha - \beta$, $\beta$ exprimant, par rapport à la masse d'azote organique N, le taux annuel de réorganisation de l'azote minéralisé dans les racines et la micropopulation du sol.

La relation proposée s'écrit, pour la couche arable :

$$N = \frac{M + O}{\gamma} - \frac{M}{\alpha} \qquad (1)$$

Cette relation a été déterminée en considérant un modèle de sol dans lequel les divers mouvements de l'azote se produisent ainsi qu'il est indiqué sur la figure 1, les

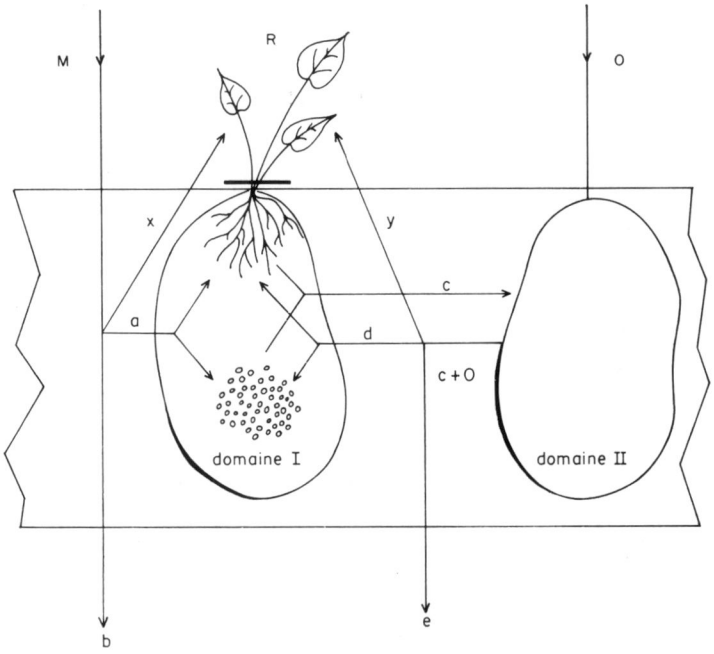



FIG. 1.

lettres symbolisant les quantités d'azote mises en jeu pendant l'unité de temps choisie. Précisons que la représentation de ces mouvements tient compte :

— des apports M et O, des exportations R par la récolte et des pertes P ;

— d'une division de l'espace du sol en deux domaines dans lesquels se répartit l'azote organique total : un premier domaine I est représenté par l'ensemble des organismes vivants du sol (racines, micropopulation) dont l'activité conduit à l'organisation d'une fraction de l'azote minéral apporté au sol ou issu de la minéralisation. Le second domaine 2 correspond à la masse de substances organiques « non vivantes » du sol, contenant la quantité N d'azote organique dont une partie se trouve chaque année minéralisée. Sous un climat tempéré, cette masse N peut, sans erreur grave, être assimilée à la quantité totale d'azote organique du sol, aisément accessible à l'analyse. Soulignons aussi que les domaines I et II sont dans le sol étroitement imbriqués.

Par ailleurs, la relation (1) a été établie en utilisant également l'hypothèse suivante : la racine végétale, de même que le micro-organisme, ne font aucune distinction entre l'azote reçu par le sol et l'azote issu de la minéralisation de l'azote organique du domaine II ; la même hypothèse est aussi appliquée aux pertes d'azote minéral du sol.

Nous nous proposons, dans cette note complémentaire, de nous référer au modèle de sol défini pour examiner quelques questions relatives à la quantité d'azote organique du sol et à son entretien. Nous utiliserons dans ce but la relation (1) sous deux formes nouvelles :

— l'une exprime, sous une symbolique légèrement différente, la quantité N d'azote organique d'un sol en équilibre azoté,

— l'autre définit la quantité d'azote organique perdue chaque année par le sol et qu'il est nécessaire de lui restituer pour le maintenir en équilibre.

## QUANTITÉ D'AZOTE ORGANIQUE DU SOL

Désignons par $\omega = \frac{\beta}{\alpha}$ la proportion d'azote minéralisé, issu de N, qui se réorganise annuellement dans le sol (racines, micropopulation).

La relation (1) devient :

$$N = \frac{O + \omega M}{\alpha(1 - \omega)} \qquad (2)$$

La quantité N est fonction des quantités d'azote apportées au sol sous forme organique et minérale d'une part, du taux réel de minéralisation et de la proportion d'azote minéralisé qui se réorganise d'autre part. Remarquons que la quantité d'azote cédée par le sol (récoltes, pertes) n'apparaît pas dans les relations proposées ; cela s'explique par le fait que dans un sol en équilibre, les quantités d'azote perdues sont égales à celles qui y sont incorporées, représentées par M et O. Aussi, les facteurs du niveau de l'azote organique du sol demeurent-ils M, O, $\alpha$ et $\omega$.

Lorsqu'un équilibre azoté se trouve réalisé dans un sol, il est intéressant de connaî-

tre dans quel sens cet équilibre se modifie à la suite d'un changement des facteurs extérieurs de cet équilibre. Dans un complexe pédo-climatique donné, ceux-ci sont non seulement M et O, mais aussi d'autres facteurs culturaux tels que le changement des espèces cultivées, les modifications du travail du sol, les variations de l'importance des fumures autres que la fumure azotée, l'irrigation, le drainage, la suppression de la végétation dans un but expérimental, etc....

A la suite du changement de l'un ou de plusieurs des facteurs extérieurs de l'équilibre azoté du sol, les modifications de $\alpha$ et de $\omega$ se caractérisent :

— par leur sens, $\alpha$ et $\omega$ pouvant augmenter ou diminuer ; afin de mieux estimer la variation de $\omega$, il est parfois opportun de scinder ce paramètre en ses deux composantes :

$\omega_1$ correspondant à la réorganisation dans les racines ;

$\omega_2$ relatif à la réorganisation dans la micropopulation ;

— par leur variation dans le temps jusqu'à ce que le nouvel équilibre soit établi, $\alpha$ et $\omega$ n'atteignant certainement pas immédiatement leurs valeurs définitives.

A titre d'exemples, nous pouvons présumer qu'une diminution de la quantité d'azote organique incorporée, corrélative d'un abaissement des apports de carbone, conduit à un fléchissement de $\omega$ ; la suppression totale des fumures à titre expérimental, induit vraisemblablement un abaissement lent de $\alpha$ (MOREL, 1968) ; l'absence de végétation entraîne l'arrêt de la réorganisation de l'azote dans les racines et en conséquence une diminution de $\omega$. Remarquons que l'influence de certaines modifications des facteurs extérieurs sur $\alpha$ et $\omega$ peut être prévue avec une part raisonnable d'exactitude ; pour d'autres modifications, la réponse demeure indécise.

Connaissant le sens de variation de $\alpha$ et de $\omega$, il est alors possible, dans un certain nombre de cas, de déduire de la relation (2) l'évolution correspondante du niveau N de l'azote organique du sol. Pour d'autres situations et dans l'ignorance actuelle des variations relatives de $\alpha$ et de $\omega$, la discussion de la relation (2) demeure aléatoire ; tel peut être par exemple le cas dans lequel, M et O restant constants, $\alpha$ et $\omega$ augmentent simultanément.

Les variations dans le temps de $\alpha$ et de $\omega$ sont responsables des caractéristiques de l'évolution du niveau azoté N du sol entre les deux états d'équilibre initial et final.

Nous donnons ci-après un exemple d'application de la relation (2) à l'interprétation d'un fait expérimental.

### *Interprétation d'un fait expérimental*

L'un des essais réalisés dans le champ d'expériences de la Station agronomique de Grignon consiste notamment à suivre dans le temps l'évolution du taux d'azote organique dans un sol maintenu sans végétation et recevant chaque année, par hectare, 70 kilogrammes d'azote minéral et 7 000 kilogrammes de paille de céréales. Deux labours sont effectués en automne et au printemps afin d'assurer une répartition homogène de la paille dans le sol. Avant la mise en place de l'essai, le sol était cultivé, et recevait rarement de faibles fumures.

Au cours de l'expérience, le taux d'azote total s'est abaissé en 9 années de 1,53 p. 1 000 à 1,39 p. 1 000 (diminution de 9,3 p. 1 000), ce qui parait surprenant en raison des quantités d'azote et de substances organiques apportées au sol.

Les parcelles étudiées sont contiguës à un dispositif d'essais de longue durée sur lequel une étude expérimentale de l'évolution dans le temps du taux d'azote du sol a permis de déterminer les valeurs de $\alpha$ et de $\omega$ : pour des parcelles cultivées, exclusivement fertilisées avec des engrais minéraux (N, P, K), $\alpha$ et $\omega$ ont été estimés respectivement à 0,025 et 0,5. Toutefois, ces valeurs ne sauraient être appliquées sans modification à l'essai étudié qui est un dispositif sans culture ; elles situent cependant des ordres de grandeur susceptibles d'être considérés comme base de discussion.

Les caractéristiques expérimentales de l'expérience conduisent à penser :

— que le paramètre $\alpha$, à l'équilibre, sera probablement plus élevé qu'au début de l'expérience : l'apport simultané dans le sol de quantités substantielles d'azote et de carbone, ainsi que l'exécution de deux labours annuels, stimulent la minéralisation (fig. 2) ;

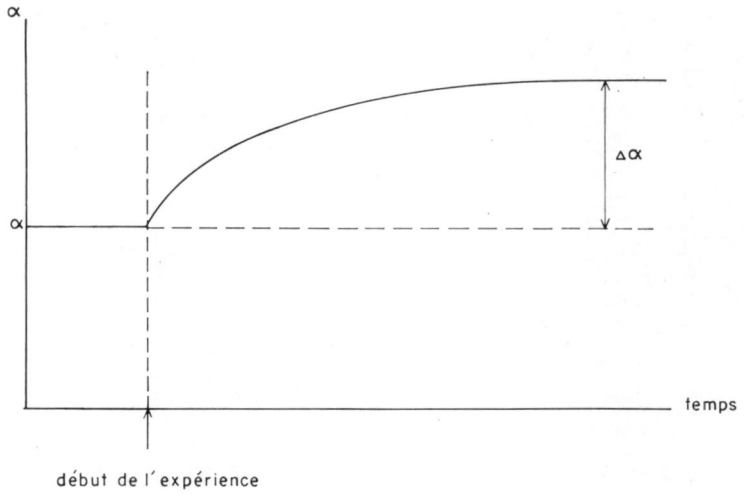



FIG. 2. — *Variation de* $\alpha$

— que le paramètre $\omega$ reflétera d'une part l'influence favorable à la réorganisation de l'azote de l'addition au sol de substances carbonées et azotées, d'autre part l'effet de l'absence de végétation qui supprime la réorganisation par les racines (graphes 1 et 2, fig. 3).

Dressons alors un tableau des valeurs de N calculées par la relation (2) et dans laquelle les données suivantes sont utilisées :

O = 28 kilogrammes par hectare et par an (azote de la paille enfouie)

M = 70 kilogrammes

$\alpha$ et $\omega$ sont choisis parmi les valeurs possibles relatives au dispositif expérimental étudié en tenant compte des observations précédentes.

Nous constatons que des taux d'azote peuvent être nettement inférieurs à 1,39 p. 1 000 avec des valeurs plausibles de $\alpha$ et de $\omega$ (taux marqués d'un astérique.)

Ainsi, malgré des apports importants de paille et d'azote minéral, un taux d'azote à l'équilibre très nettement inférieur à celui qui est actuellement constaté s'explique

aisément : il suffit que $\alpha$ soit relativement élevé et que $\omega$ accuse une augmentation modérée ou négligeable, ou bien marque une diminution (fig. 3). C'est vraisemblablement ce qui se produit au cours de l'expérience étudiée dans laquelle, notamment, l'absence de végétation annule la participation des racines à la réorganisation de l'azote : l'accroissement de O et de M ne compense pas l'influence des conditions nouvelles appliquées au sol sur les paramètres $\alpha$ et $\omega$ (relation 2).

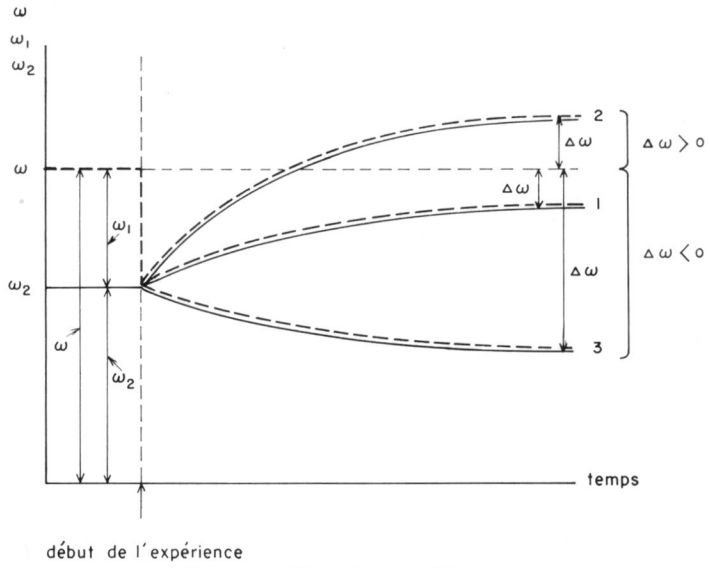



FIG. 3. — *Variations possibles de* w
1, 2 : cas d'une augmentation de $w_2$
3 : cas d'une diminution de $w_2$

TABLEAU I

| $\alpha$ Taux réel de minéralisation | $\omega$ | $\gamma$ Taux net de minéralisation | Taux d'azote p. 1 000 |
|---|---|---|---|
| 0,040 | 0,4 | 0,024 | 0,77* |
| 0,035 | 0,4 | 0,021 | 0,88* |
| 0,030 | 0,4 | 0,018 | 1,04* |
| 0,025 | 0,4 | 0,015 | 1,24* |
| 0,040 | 0,5 | 0,020 | 1,05* |
| 0,035 | 0,5 | 0,017 | 1,2 * |
| 0,030 | 0,5 | 0,015 | 1,4 |
| 0,025 | 0,5 | 0,012 | 1,68 |
| 0,040 | 0,6 | 0,016 | 1,46 |
| 0,035 | 0,6 | 0,014 | 1,67 |
| 0,030 | 0,6 | 0,012 | 1,94 |
| 0,025 | 0,6 | 0,010 | 2,33 |

Nous pouvons aussi nous demander quelle serait l'évolution du taux d'azote si, les apports de paille et d'azote minéral demeurant identiques, les parcelles étaient cultivées. Il est difficile de préjuger de la modification de $\alpha$ par la culture ; par contre, le développement des racines majorerait vraisemblablement $\omega$ : si nous supposons $\alpha$ peu altéré, le calcul montre que le taux d'azote du sol serait très nettement relevé. Ainsi, pour $\alpha = 0{,}030$, des valeurs de $\omega$ de 0,45, 0,50 et 0,55 conduiraient à des taux d'azote de 1,2, 1,4 et 1,64 p. 1 000. Cet exemple souligne, en la précisant, la part que peut prendre la végétation dans le maintien du taux d'azote organique du sol.

## PERTES ET GAINS ANNUELS D'AZOTE ORGANIQUE

Égales aux gains dans un sol en équilibre, les pertes sont représentées par la quantité d'azote organique annuellement détruite par minéralisation, diminuée de la fraction de cet azote qui se réorganise. Elles sont aussi équivalentes à la quantité d'azote minéralisé éliminée du sol dans la récolte($y$) et les pertes proprement dites ($e$) (fig. 1). Elles ont pour valeur la quantité N d'azote organique du sol multipliée par le taux net annuel de minéralisation.

Les expressions (1) et (2) peuvent s'écrire :

$$N\gamma = O + \omega M \tag{3}$$

Les hypothèses proposées pour l'établissement de la relation (1) impliquent que :

$$\frac{a}{M} = \frac{d}{c + O} = \frac{\beta}{\alpha} = \omega$$

Dans ces conditions, la valeur de $\omega M$ est $a$, quantité prélevée sur l'azote minéral apportée au sol et organisée dans les racines et la micropopulation (fig. 1) ; la relation (3) devient :

$$N\gamma = O + a \tag{4}$$

relation qui exprime l'égalité entre les pertes et les gains annuels d'azote organique ; les gains comprennent bien en effet les apports O d'azote organique augmentés de la fraction $a$ de l'azote minéral incorporé au sol organisée dans les êtres vivants.

La relation (3) établit que l'entretien de l'azote organique peut être assuré soit par un apport d'azote organique seul, soit par un apport d'azote minéral seul, soit par une association des deux formes d'azote. Elle explicite en notation symbolique les nombreuses observations qui suggèrent que l'azote minéral apporté contribue à l'édification de la masse des substances organiques azotées du sol.

Indépendamment des raisonnements qui ont conduit aux relations proposées, ces seules observations auraient pu permettre de poser directement une relation empirique telle que :

$$N\gamma = O + \mu M$$

dans laquelle l'influence de M serait attachée à la connaissance du coefficient $\mu$. L'expression (3) montre que ce coefficient revêt une signification précise puisqu'il n'est autre que $\omega = \frac{\beta}{\alpha}$.

La quantité O d'azote organique devant être chaque année introduite dans le sol pour assurer l'équilibre azoté a pour valeur :

$$O = N\gamma - \omega M \tag{5}$$

La relation (3) peut être représentée dans un système d'axes orthonormés (fig. 4) en portant respectivement les quantités M, $\omega$ et $N\gamma$ sur les axes $x$, $y$, $z$, en notant que $0 < \omega < 1$. Pour toute valeur de M et de $\omega$, la quantité O est la distance d'un plan $P_2$ au plan de base $P_1$ de cote nulle. La quantité $\omega M$ est représentée, pour $\omega$ et M donnés, par la distance comprise entre le plan $P_2$ et la plage de paraboloïde hyperbolique d'équation (3), correspondant aux limites des paramètres considérés ; cette distance a pour valeur : $S = \omega M = N\gamma - O$.

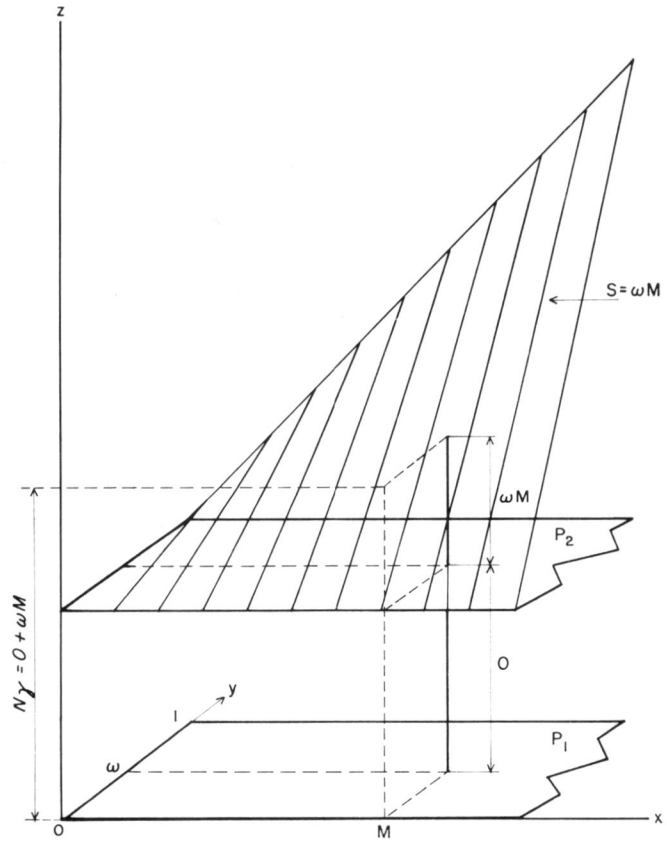



FIG. 4.

*Application à un problème d'entretien du niveau d'azote organique du sol*

L'entretien du niveau d'azote organique d'un sol en équilibre peut, ainsi qu'il a été énoncé, être obtenu par apport d'azote organique, minéral ou par association des deux formes. Toutefois, les conditions requises pour assurer à $\alpha$ et $\omega$ une valeur convenable étant satisfaites, un niveau élevé ne peut être atteint par l'utilisation

d'azote minéral seul que dans la mesure où les quantités apportées au sol ne sont pas préjudiciables aux récoltes.

Nous donnons ci-après un exemple plausible qui n'est pas le résultat d'une expérimentation, mais dont la discussion illustre les possibilités d'utilisation de la relation (3).

Soit un sol en équilibre azoté, contenant dans sa couche arable 1,7 p. 1 000 d'azote et recevant, en moyenne par hectare et par an, au cours d'une rotation, 10 000 kilogrammes de fumier (50 kg d'azote organique) et 60 kg d'azote minéral. Le taux net annuel de minéralisation, pour la couche arable est estimé à 1,5 p. 1 000. Ces données se résument ainsi :

$$N = 5\,100 \text{ kg} \qquad O = 50 \text{ kg} \qquad M = 60 \text{ kg} \qquad \gamma = 0{,}015$$

Calculé d'après la relation (3), $\omega$ a pour valeur 0,44, d'où il est déduit : $\alpha = 0{,}0268$ et : $\beta = 0{,}0118$.

A la suite d'un changement de système d'exploitation, les 10 000 kilogrammes de fumier sont remplacés par 7 000 kilogrammes de paille contenant en moyenne 0,4 p. 100 d'azote. Proposons-nous de calculer la quantité M d'azote minéral à apporter par hectare et par an pour maintenir le niveau d'équilibre azoté du sol.

Nous supposerons deux cas :

*Premier cas :*

$\alpha$ et $\beta$ ne changent pas ; $\omega$ et $\gamma$ demeurent alors fixes. Les données correspondant au nouvel équilibre du sol sont les suivantes :

$$N = 5\,100 \text{ kg} \qquad O = 28 \text{ kg} \qquad \gamma = 0{,}015 \qquad \omega = 0{,}44$$

La quantité M cherchée, déduite de la relation (3), a pour valeur 110 kilogrammes au lieu de 60 kilogrammes dans le premier système.

*Deuxième cas :*

L'apport supplémentaire d'azote minéral ainsi que l'incorporation au sol de quantités importantes de substances organiques non préhumifiées peut avoir une action favorable sur le développement des récoltes et de la micropopulation du sol ; il en résulte une amplification des processus de réorganisation ce qui se traduit par un accroissement de $\beta$ ; fixons arbitrairement la nouvelle valeur de ce coefficient à 0,0130. Si nous supposons par ailleurs $\alpha$ sensiblement constant, les données relatives au second système deviennent :

$$N = 5\,100 \text{ kg} \qquad O = 28 \text{ kg} \qquad \gamma = 0{,}0138 \qquad \omega = 0{,}49$$

Le calcul donne pour valeur de M : 87 kilogrammes. Le maintien du niveau d'azote organique du sol est assuré dans ce second cas par l'apport annuel de 7 000 kilogrammes de paille et 87 kilogrammes d'azote minéral.

### *Entretien du niveau d'azote organique dans des conditions variées*

Le tableau 2 indique quelques exemples de restitutions annuelles d'azote organique à réaliser pour maintenir en équilibre azoté des sols de taux d'azote et de minéralisation variés.

— Nous considérons dans ce tableau des sols contenant 1, 1,4 et 1,8 p. 1 000 d'azote organique et présentant des taux nets annuels de minéralisation ($\gamma$) s'échelonnant de 1,2 à 2,1 p. 100 ; les taux les plus élevés sont affectés aux sols les plus pauvres en azote.

— Deux doses différentes d'azote minéral sont envisagées : 80 et 120 kilogrammes par hectare et par an (moyenne établie pour une rotation).

— Les restitutions annuelles d'azote organique O nécessaires pour assurer le maintien du sol en équilibre azoté sont calculées en kilogrammes par hectare (relation 5) ; elles sont réalisées :

— d'une part avec des pailles (0,4 p. 100 d'azote)

— d'autre part avec du fumier d'étable (0,6 p. 100 d'azote).

— Les valeurs de $\omega$ sont choisies parmi des valeurs plausibles, égales à 0,45 dans le cas de restitutions avec le fumier, à 0,50 dans le cas de restitutions avec des pailles. Notons que, dans la réalité, il est vraisemblable que $\omega$ diffère avec chaque groupe de valeurs N, $\gamma$ et M proposé.

— Lorsque le calcul conduit à des restitutions nulles en azote organique, c'est que la quantité d'azote minéral apportée est suffisante ou en excès pour assurer le maintien de l'équilibre ; dans ce dernier cas, un niveau d'équilibre azoté plus élevé que le niveau initial s'établit, qui est calculé pour deux valeurs de $\omega$ : 0,45 et 0,50.

— Avec les valeurs de $\omega$ choisies pour établir le tableau, nous remarquons que les restitutions sont très généralement moins importantes avec le fumier qu'avec

TABLEAU 2

| N p. 1 000 de terre | $\gamma$ | M en kg/ha | Restitutions calculées | | Taux d'azote p. 1 000 dans le nouvel équilibre | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Paille kg/ha | Fumier kg/ha | $\omega = 0{,}45$ | $\omega = 0{,}50$ |
| 1,0 | 0,015 | 80 | 1 250 | 1 500* | | |
| 1,0 | 0,015 | 120 | 0 | 0 | 1,2 | 1,3 |
| 1,0 | 0,018 | 80 | 3 500 | 3 000 | | |
| 1,0 | 0,018 | 120 | 0 | 0 | 1,0 | 1,1 |
| 1,0 | 0,021 | 80 | 5 750 | 4 500 | | |
| 1,0 | 0,021 | 120 | 750 | 1 500* | | |
| 1,4 | 0,012 | 80 | 2 600 | 2 400 | | |
| 1,4 | 0,012 | 120 | 0 | 0 | 1,5 | 1,7 |
| 1,4 | 0,015 | 80 | 5 750 | 4 500 | | |
| 1,4 | 0,015 | 120 | 750 | 1 500* | | |
| 1,4 | 0,018 | 80 | 8 900 | 6 600 | | |
| 1,4 | 0,018 | 120 | 3 900 | 3 600 | | |
| 1,8 | 0,012 | 80 | 6 200 | 4 800 | | |
| 1,8 | 0,012 | 120 | 1 200 | 1 800* | | |
| 1,8 | 0,015 | 80 | 10 250 | 7 500 | | |
| 1,8 | 0,015 | 120 | 5 250 | 4 500 | | |
| 1,8 | 0,018 | 80 | 14 300 | 10 200 | | |
| 1,8 | 0,018 | 120 | 9 300 | 7 200 | | |

les pailles. Cependant, dans quelques cas, le contraire se produit (quantités marquées d'un astérisque). Nous ignorons si cette observation peut refléter la réalité.

## DÉTERMINATION DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES UTILISÉS

Les quantités d'azote minéral et organique apportées étant connues, deux paramètres fondamentaux sont nécessaires pour définir le niveau d'azote organique du sol et l'importance des apports correspondants à l'entretien de ce niveau azoté :

— l'un, $\alpha$, caractérise l'importance des processus de minéralisation,

— l'autre, $\beta$, précise l'ampleur de la réorganisation de l'azote minéralisé.

$\gamma$ et $\omega$ représentent des combinaisons de $\alpha$ et $\beta$.

Les paramètres $\alpha$, $\gamma$ et $\omega$ ont, pour des raisons de commodité, été de préférence choisis dans les raisonnements précédents au cours desquels l'expression de N était utilisée sous les deux formes :

$$N = f(M, O, \alpha, \omega) \quad (6)$$

$$N = f(M, O, \gamma, \omega) \quad (7)$$

Dans un sol en équilibre azoté, N, M et O étant connus, la détermination de $\alpha$, $\beta$, $\gamma$ et $\omega$ nécessite la connaissance de l'une au moins de ces quatre valeurs ; ainsi, d'après la relation (7), $\omega$ peut se définir sous la forme :

$$\omega = f(N, M, O, \gamma) \quad (8)$$

Cette dernière expression a été utilisée dans l'exemple cité au paragraphe précédent, $\omega$ étant déduit de la relation (3), connaissant N, M, O, et $\gamma$.

Pour un sol réel, la détermination de l'un des quatre paramètres précités pose des problèmes complexes. L'une des valeurs actuellement accessible par les méthodes analytiques habituelles est le taux net annuel de minéralisation ($\gamma$), valeur dont l'approche nécessite des observations ou expérimentations de longue durée.

La détermination du taux réel de minéralisation et du taux de réorganisation a été abordée par l'utilisation de l'azote 15 (DON KIRKHAM et BARTHOLOMEW, 1955, I et II). L'emploi de cet isotope pourrait aussi, semble-t-il, être envisagé d'une façon différente par l'estimation de la part de l'azote de la récolte prélevée sur l'azote minéral apporté au sol. La référence au modèle de sol qui a permis d'établir les relations utilisées dans cette note montre en effet que $\alpha$, $\beta$, $\gamma$ et $\omega$ s'expriment aisément en fonction du paramètre $\rho = \frac{x}{R}$ (fig. 1). Ainsi, par exemple :

$$\omega = 1 - \frac{\rho(M + O)}{M}$$

## CONCLUSION

Établies d'après un modèle de sol, les relations discutées dans ce mémoire mettent en évidence les facteurs essentiels de la quantité d'azote organique dans un sol en équilibre azoté ; ces facteurs sont d'une part les apports d'azote au sol (minéral et organique), d'autre part l'importance des processus de minéralisation et l'ampleur

de la réorganisation de l'azote minéralisé. Elles donnent la possibilité de prévoir dans un certain nombre de cas le sens dans lequel le niveau d'équilibre azoté du sol évolue à la suite de modifications apportées au traitement du sol.

Les relations proposées permettent de suggérer des interprétations de faits expérimentaux : il est aisé d'expliquer, par exemple, une diminution rapide du taux d'azote du sol consécutive à la suppression des cultures, malgré des apports substantiels d'azote minéral et de matière organique.

Tenant compte des deux formes d'azote susceptibles d'être incorporées au sol (minérale et organique), les relations citées offrent aussi des orientations nouvelles pour traiter le problème de l'entretien du niveau d'azote organique dans un sol en équilibre.

Toutefois, nous ne nous dissimulons pas que le modèle de sol utilisé dans cette note est une représentation dans l'unité de temps de bilans globaux qui masquent souvent le détail de phénomènes très complexes (« turnover » de périodes différentes, notamment).

Cependant, malgré leur caractère simplifié, ces bilans sont trop détaillés encore pour que chacun de leurs termes soit accessible à l'expérience. De fait, l'une des rares données dont nous pouvons actuellement disposer concerne le taux net de minéralisation ($\gamma$) mais qui, à lui seul, se révèle insuffisant pour interpréter certains faits expérimentaux. A ce titre, les raisonnements établis d'après le modèle proposé, soulignant l'intérêt de considérer la proportion de l'azote minéralisé qui se réorganise, semblent pouvoir ouvrir une voie d'accès à une meilleure compréhension des phénomènes observés.

*Reçu pour publication en mars 1970.*

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier vivement M.M. Barbier, Monnier et Turc qui ont bien voulu marquer l'intérêt qu'ils portaient à ce travail en m'offrant l'occasion de fructueux échanges de vues.

## SUMMARY

### NEW PROPOSALS ON THE PROBLEM OF ORGANIC NITROGEN IN A SOIL IN NITROGEN BALANCE

In a previous paper we postulated a model relationship for a soil in nitrogen balance, showing the total N per surface unit ; this relationship can be expressed as :

$$N = \frac{O + \omega M}{\alpha (1 - \omega)} \qquad (I)$$

O and M are the respective quantities of organic and mineral nitrogen added to the soil and $\alpha$ the actual annual rate of mineralization of the organic nitrogen ; the parameter $\omega$ has the value $\frac{\beta}{\alpha}$ $\beta$ being, as regards total nitrogen content, the yearly rate of immobilization of the mineralised nitrogen.

If the soil treatment is changed, the content of organic nitrogen is altered ; using formula (1) we can adequately estimate this alteration to the extent that it is possible to estimate the respective variations of $\alpha$ and $\omega$, caused by the new conditions to which the soil has been submitted.

The relationship expressed by (1) also allows us to interpret some experimental results ; for instance, it becomes easy to explain the rapid fall in organic nitrogen where cropping has ceased, although the soil is still receiving substantial additions of organic and mineral nitrogen.

The formula (1) can also be expressed as $N\gamma = O + \omega M$ (2) in which $\gamma$, which has the value $\alpha$-$\beta$, is the net annual rate of mineralization. $N\gamma$ represents the annual loss of organic nitrogen and, consequently is the amount of nitrogen needed by the soil in order to maintain nitrogen balance. Formula (2) thus allows us to tackle the problem of maintaining the organic nitrogen level of a soil, taking account of the quantities of mineral nitrogen added.

## ZUSAMMENFASSUNG

### NEUE VORSCHLÄGE ZUM PROBLEM DES ORGANISCHEN STICKSTOFFS IN EINEM BODEN IM STICKSTOFFGLEICHGEWICHT

In einer früheren Arbeit stellten wir eine, die Gesamtstickstoffmenge pro Oberflächeneinheit ausdrückende Gleichung, für ein Modell eines Bodens im Stickstoffgleichgewicht, auf ; diese Gleichung kann in der folgenden Form ausgedrückt werden :

$$N = \frac{O + \omega M}{\alpha (1 - \omega)} \qquad (1)$$

wobei O und M die Beträge des dem Boden zugefügten organischen bzw. arnorganischen Stickstoffs ausdrücken und $\alpha$ das tatsächliche, jährliche Mass des mineralisierten, organischen Stickstoffs ; das Parameter $\omega$ ist $\frac{\beta}{\alpha}$, wobei $\beta$ das jahrliche Mass der Umbildung des mineralisierten Stickstoffs, mit Bezug auf den Gesamtgehalt an anorganischem Stickstoff, darstellt.

Wenn Änderungen in der Behandlung des Bodens eintreten, so ändert sich das Niveau des organischen Stickstoffs ; durch Anwendung der Gleichung (1) können die möglichen Veränderungen der Werte von $\alpha$ bzw. $\omega$, die durch die neuen, dem Boden auferlegten Bedingungen hervorgerufen werden, annähernd bestimmen werden.

Die Gleichung (1) erlaubt es auch, experimentelle Tatsachen auszulegen so wird es z. B. leicht, die schnelle Abnahme des organischen Stickstoffniveaus zu erklären, die der Ausschaltung der Bebauung auf einem Boden, dem jedoch beträchtliche Mengen von anorganischem und organischem Stickstoff zugeteilt werden, folgt.

Die Gleichung (1) kann auch in der Form $N\gamma = O + \omega M$ (2) geschrieben werden, ein Ausdruck worin $\gamma$ den Wert $\alpha$-$\beta$ hat und das Nettomass der jährlichen Mineralisierung darstellt. $N\gamma$ gibt den jährlichen organischen Stickstoffverlust an, und daher auch die dem Boden zuzufügende Stickstoffmenge, damit er im Stickstoffgleichgewicht bleibe. Die Gleichung (2) erlaubt es daher an das Problem der Aufrechterhaltung des organischen Stickstoffniveaus im Boden, unter Berücksichtigung des ihm zugeteilten anorganischen Stickstoffs, heranzutreten.

0 036083 9.

## РЕЗЮМЕ

*Новые данные в отношении проблемы органического азота в почве при равновесном состоянии в ней этого элетента.*

Р. МОРЭЛЬ.

В пред' идущей работе, для модели почвы с равновесным состоянием в ней азота, было установлено соотношение выражающее общее количество азота на единицу площади; это соотношение можно выразить формулой :

$$N = \frac{O + \omega M}{\alpha (1 - \omega)} \qquad (1)$$

В этой формуле O и M представляют соответственные количества органического и минерального азота, принесенные в почву и $\alpha$-реальный годовой процент минерализованного органического азота; параметр $\omega$ выражается соотношением $\frac{\beta}{\alpha}$ в котором $\beta$ является годовым процентом реорганизации минерализованного азота, по отношению к общему количеству органического азота.

Если меняются способы обработки почвы, процент органического азота изменяется также; направление этого изменения можно предвидеть применяя эту формулу (1), при условии возможности предварительной оценки соответственных вариаций $\alpha$ и $\omega$, вызванных новыми условиями в которые поставлена почва.

Фомула (1) предоставляет также возможность интерпретации экспериментальных фактов : становится например легким об'яснить быстрое уменьшение количеств органического азота, вызванное ликвидацией культур в почве, продолжающей между тем получать крупные подкормки органическим и минеральным азотом.

Формулу эту можно также выразить уравнением $N\gamma = 0 + \omega M$ (2), в котором величина $\gamma$ равняется $\alpha$-$\beta$ и представляет чистый годовой процент минерализации, $N\gamma$-выражает годовые потери органического азота, и значит, количества этого элемента необходимые почве для поддержания в ней азотного равновесия. С помощью формулы (2) можно также предпринять решение задачи поддержания в почве уровня органического азота, с учетом количеств принесенного в нее менирального азота.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Don Kirkham et Bartholomew W. W., 1955. Equations for following nutrients transformations in soil, utilising tracer date. I. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **19**, 33-34.

Don Kirkham et Bartholomew W. V., 1955. Equations for following nutrients transformations in soil, utilising tracer date. II. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **19**, 189-192.

Morel R,. 1968. Évolution de l'azote et du carbone organiques du sol au cours d'une expérience de longue durée. ***Ann. agron.***, **19** (2), 153-174.

Morel R., 1969. Essai de déterminations quantitatives relatives à l'évolution de l'azote dans un sol cultivé en équilibre azoté. *Ann. agron.*, **20**, 2, 161-181.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (2), 211-228.

# ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA RÉTENTION PAR UN SOL CALCAIRE, SOUMIS A UN LESSIVAGE INTENSE, DE DOSES MASSIVES DE POTASSIUM

J.-P. ANDRÉ

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches de Colmar*
*Institut national de la Recherche agronomique*

## RÉSUMÉ

Dans ces expériences, des échantillons homogènes d'environ 1 kg d'un sol calcaire, placés dans des tubes à percolation, reçoivent des doses massives de chlorure de potassium pouvant égaler leur capacité d'échange pour les cations (C. E. C.).

Si l'on soumet ces colonnes à un lessivage à l'eau pure, de plusieurs centaines de mm/jour, on peut montrer que la réaction du sol à l'égard des ions $K^+$ comporte un temps d'adsorption, suivi d'un temps de désorption.

Le rendement de l'adsorption $\frac{K^+ \text{ retenu}}{K \text{ apporté}}$ est particulièrement élevé. Quant à la désorption, il paraît établi qu'elle est provoquée par les ions $Ca^{++}$ mis en solution, aux dépens du calcaire, par le gaz carbonique qui se forme dans le sol.

Ces conclusions peuvent être utilisées pour juger des conditions de restitution du potassium par les déjections des troupeaux en pâture, sur sol calcaire.

## INTRODUCTION

Dans les conditions de fertilisation normale, les doses annuelles de potassium appliquées au sol dépassent rarement 1 à 2 p. 100 de sa capacité de saturation, de sorte que la rétention peut être considérée comme complète, dans l'épaisseur de la couche de terre arable.

Il semble qu'il n'en soit pas ainsi dans le cas de la fertilisation due aux déjections des bovins en pâture, en particulier en ce qui concerne le potassium apporté par les urines (tabl. 1). En effet, tant par la concentration très élevée en cet élément,

que par la localisation de l'apport et la vitesse d'infiltration, cette restitution s'effectue dans des conditions qui nuisent à une bonne rétention des ions $K^+$ par le sol. A des pertes « instantanées » éventuelles s'ajoutent celles, inévitables, que provoque le drainage et que de nombreuses observations lysimétriques ont mises en évidence (BASTISSE, 1951, 1953 ; BASTISSE et HÉNIN, 1955 ; COLLIER et ROBELIN, 1959 ; COPPENET, 1969).

TABLEAU I

*Restitution des éléments N, P et K par les déjections des bovins*

| | Urines | Bouses |
|---|---|---|
| Quantité moyenne rejetée par jour et par animal ..... | 10 litres | 30 kg |
| Teneur en N °/oo ..... | 1,5 | 1,0 |
| $P_2O_5$ °/oo ..... | traces | 0,6 |
| $K_2O$ °/oo ..... | 5 à 18 | 1,5 |
| Ordre de grandeur : | | |
| de la fertilisation potassique au « point de chute » (pour une miction) exprimé en tonnes/ha ..... | 1 à 4 tonnes/ha | — |
| du débit d'infiltration en ce « point » (pour une miction) exprimé en mm/jour ..... | plus de 1 000 mm/j | — |

Notons que, pour les vaches laitières, ces restitutions représentent 80 à 95 p. 100 de leurs prélèvements en ces éléments.

Dans quelle mesure le potassium est-il retenu par un sol lorsqu'il est apporté à des doses de plus en plus élevées ?

Quelle est sur cette rétention l'influence de la vitesse d'infiltration de la solution potassique dans le sol? Quelle est l'importance des pertes provoquées par un lessivage intense? C'est pour répondre à ces questions qu'ont été entreprises les expériences qui font l'objet de ce mémoire.

## MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Comme il s'agissait d'orienter les recherches, nous nous sommes placés dans des conditions expérimentales simples :

1. le sol étudié a été mis dans des tubes à percolation dans des conditions reproductibles ;

2. on a soumis les colonnes de ce sol à un lessivage continu à l'eau permutée de plusieurs centaines de mm par jour ;

3. *en régime de lessivage*, les colonnes ont reçu des doses variées de potassium sous forme de solution normale de KCl, ces doses étant comprises entre zéro (colonnes témoin) et une valeur correspondant sensiblement à la capacité d'échange pour les cations, ou C. E. C., d'une colonne ;

4. on a relevé chaque jour le débit et la composition ionique des percolats en s'attachant en particulier aux cations $K^+$ et $Ca^{++}$ et aux anions $Cl^-$, puis $HCO_3^-$ et $CO_3^=$ qui les accompagnent.

(Toutes les quantités d'ions ont été exprimées ici en milliéquivalents, ou méq.)

### 1. *Matériel expérimental*

Nous avons monté une batterie de tubes à percolation capables de contenir des échantillons de sol d'un poids de 1 kg (FEODOROFF, 1965 ; COURAU, 1969). Les tubes en chlorure de polyvinyle opaque ont un volume utile de 720 $cm^3$ pour une longueur totale de 50 cm et une section circulaire de 16 $cm^2$. A leur extrémité inférieure, coupée légèrement en biseau, s'adapte un fond moulé de même matière, jointoyé par un ruban adhésif. Un tuyau de polyéthylène souple, d'un diamètre intérieur de 3 mm, collé au bas de chaque tube, conduit les percolats dans des flacons récepteurs tarés d'une capacité de 1 litre environ.

Nous remplissons les tubes, en introduisant d'abord 50 g de sable siliceux à grains ronds, puis, à l'aide d'un gros entonnoir, la quantité pesée du sol, prélevée sur une réserve d'environ 100 kg, séchée à l'air, tamisée à 2,5 mm et homogénéisée. La densité apparente de la colonne est réalisée en tapotant verticalement les tubes jusqu'au tassement désiré : cette opération est aisée, si nous nous tenons dans une gamme de densités apparentes comprises entre 1,2 et 1,4.

Les colonnes sont ensuite humectées à la pissette sur quelques centimètres d'épaisseur, puis recouvertes d'une couche d'eau permutée de hauteur constante, réglée par un vase de Mariotte commun de grand volume. Un régime de percolation saturante s'établit avec un débit moyen assez stable pendant plusieurs semaines ; après le passage d'environ 1 litre d'eau, la composition ionique des percolats se stabilise également : l'homogénéité d'une série de colonnes peut ainsi être estimée d'après les débits et les compositions de ces percolats.

### 2. *Choix des sols*

Les premières expérimentations portaient sur 3 sols :

1. des alluvions rhénanes sablo-limoneuses à 30 p. 100 de calcaire et d'une C. E. C. de 4,3 méq/100 g ;
2. des alluvions granitiques vosgiennes, non calcaires, d'une C. E. C. de 10,3 méq/100 g ;
3. un sol lœssique limoneux à 18 p. 100 de calcaire et d'une C. E. C. de 13,4 méq/100 g.

La faible perméabilité du troisième sol et le colmatage brutal du second au moment de l'apport du potassium nous ont contraint à limiter notre étude au premier dont le tableau 2 et la figure 1 donnent les caractéristiques principales :

TABLEAU 2

*Composition du sol étudié n° 1*

| | Argile | Limon | Sables | Cations échangeables (méq/100 g) | |
|---|---|---|---|---|---|
| *a* | 6,5 | 13,2 | TF : 18,9<br>F : 52,7<br>G : 6,5 | C. E. C. : 4,30<br>Mg : 0,65<br>K : 0,07<br>Na : 0,06 | Carbone org. : 0,51 %<br>Matière org. : 0,87 %<br>Azote total : 0,056 % |
| *b* | 7,8 | 6,5 | TF : 11,9<br>F : 33,9<br>G : 6,4 | | Calcaire : 30 %<br>pH : 8,2 |

*a* : analyse normale
*b* : analyse après destruction du calcaire
La fraction argileuse se compose essentiellement d'illite, de quartz et d'un peu de kaolinite.

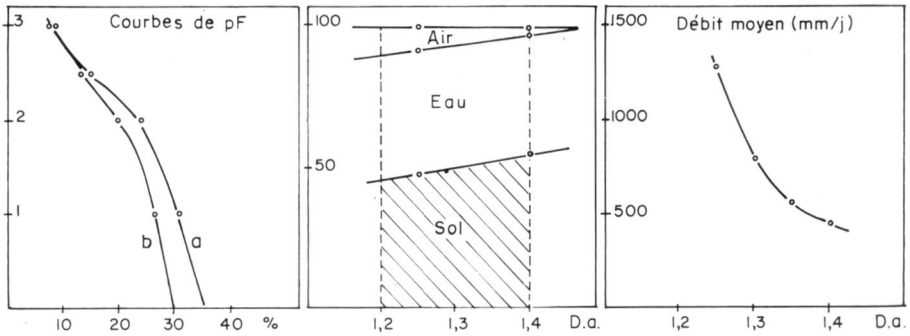



FIG. 1. — *Rapports de l'eau et du sol étudié dans les conditions expérimentales : courbes de pF pour les densités apparentes 1,20* (a) *et 1,40* (b). *Pourcentage en volume des phases solide, liquide et gazeuse et débit moyen journalier en fonction de la densité apparente.* (On notera la variation très rapide du débit pour de faibles variations de la porosité).

### 3. *Méthodes de mesure*

*Mesure du débit de percolation.*

Dans les deux premières expériences, les débits sont déterminés par la pesée quotidienne des percolats. La fréquence des mesures est suffisante vis-à-vis de la durée des expériences.

Dans la troisième expérience, les percolats sont collectés dans des fioles jaugées de 60 ml pendant la première journée, en vue d'une analyse plus continue de leur composition. Ils sont ensuite recueillis dans des flacons d'un litre.

*Dosage des cations.*

Les cations $K^+$ et $Ca^{++}$ sont dosés par photométrie de flamme ; un abaque de correction d'interférence est utilisée pour des rapports $\frac{Ca}{K}$ ou $\frac{K}{Ca}$ très élevés. L'ion $Mg^{++}$ a été négligé : il semble d'après les bilans cationiques qu'il n'entre pas notablement en jeu dans les échanges étudiés.

*Dosage des anions.*

Les chlorures sont dosés par néphélométrie de AgCl en solution d'acide nitrique environ $\frac{N}{100}$ ou par gravimétrie.

Les ions carbonate et bicarbonate sont dosés ensemble par titration avec HCl $\frac{N}{20}$ jusqu'au virage de l'héliantine sur une prise de 100 ml de percolat.

Sur une seconde aliquote égale, on transforme $HCO_3^-$ en $CO_3^=$ par un volume connu de soude $\frac{N}{20}$ ; un excès d'ions $Ba^{++}$ permet de précipiter les ions $CO_3^=$ sous forme de $BaCO_3$ et l'on dose l'excès de soude restant par HCl $\frac{N}{20}$ jusqu'au virage de la phénolphtaléine.

Un calcul simple permet de connaître la proportion des deux ions $HCO_3^-$ et $CO_3^=$.

## RÉSULTATS

Nous décrivons successivement les expériences, avant de présenter l'interprétation des résultats.

### A. — *Expériences réalisées*

1. *La première expérience* met en œuvre 8 colonnes de 1 000 g de sol, d'une densité apparente de 1,4 et d'une C. E. C. de 43 méq.

Dans un premier temps, ces colonnes reçoivent chacune et au même moment

une dose de $K^+$, comprise entre 0 et 20 méq. (1 méq. $K^+$ équivaut pour une couche de sol d'une épaisseur égale à la hauteur de la colonne et d'une surface de 1 hectare à environ 250 kg $K_2O$). Deux doses sont répétées deux fois (fig. 2 *a*).

L'analyse, indiquant l'absence de $K^+$ dans les percolats qui suivent immédiatement cet apport et la présence d'une quantité de $Ca^{++}$ sensiblement équivalente à la dose de $K^+$ apportée, nous pouvons conclure à une rétention totale du potassium (fig. 2 *b* et 2 *c*).

Dans un second temps, nous ajoutons une nouvelle dose aux colonnes B, D, E, G, H, gardant la colonne A comme témoin d'origine et les colonnes C et F comme témoins par rapport à D et G. Les secondes doses sont calculées pour que le total du potassium apporté ne dépasse pas la C. E. C. de 1 000 g de sol (fig. 2 *a*).

L'analyse des percolats de ces 5 colonnes fait apparaître qu'une nouvelle quantité de $Ca^{++}$ est éluée : on note en même temps la perte d'une certaine quantité de $K^+$ (fig. 2 *b* et 2 *c*).

La figure 2 donne simultanément, en fonction du volume de percolat écoulé, le programme d'apport du potassium dans les colonnes (fig. 2 *a*), les pertes de potassium cumulées (fig. 2 *b*), les pertes de calcium cumulées (fig. 2 *c*) et le débit moyen journalier du lessivage (fig. 2 *d*).

Dans cette représentation, les courbes montrent que lorsque la dose totale de potassium dépasse une certaine valeur de l'ordre de 35 méq., soit environ 80 p. 100 de la C. E. C., une partie de cet élément n'est pas retenue ; mais, au lieu de se limiter à l'élution de cet excès, la perte de $K^+$ se prolonge autant que dure le lessivage. En revanche, la teneur en $Ca^{++}$ des percolats retombe sensiblement à la valeur qu'elle a dans le percolat témoin A, après le passage des deux « vagues ».

Le comportement des colonnes B, G, H, montre que le sol réagit sensiblement de la même façon à une dose donnée, soit en une seule fois, soit en deux fractions successives assez rapprochées dans le temps.

L'expérience a duré 40 jours ; la diminution progressive des débits de plusieurs colonnes explique les différences entre les longueurs des différentes courbes : les volumes de percolats recueillis pendant cette durée sont dans le rapport des débits moyens.

Les chutes de débit se remarquent surtout juste après la sortie des « vagues » : on note à ce moment une peptisation de l'argile et la présence de matière organique dans les percolats, dont la turbidité diminue ensuite peu à peu.

2. *La seconde expérience*, réalisée avec 8 colonnes de 900 g de sol, d'une densité apparente plus faible de 1,25 et d'une C. E. C. de 39 méq., avait pour but de mettre en évidence une éventuelle augmentation des pertes de potassium sous l'effet d'une percolation plus rapide (cf. fig. 1 : courbe de débit moyen).

Mais le colmatage provoqué par le lessivage à l'eau du sol après qu'on l'ait saturé d'ions $K^+$ rend impossible le maintien des débits à leurs valeurs initiales qui étaient de 1 000 mm/jour.

*Remarque :* L'étude et le contrôle du paramètre « débit » pour des valeurs élevées paraît difficile dans ces conditions expérimentales : une modification des dimensions des colonnes semble sans effet ; seul l'emploi, pour le lessivage, d'une solution saline de concentration convenable peut maintenir une perméabilité du sol suffisante ; mais on provoque alors rapidement l'échange de K par le cation de la solution, ou bien,

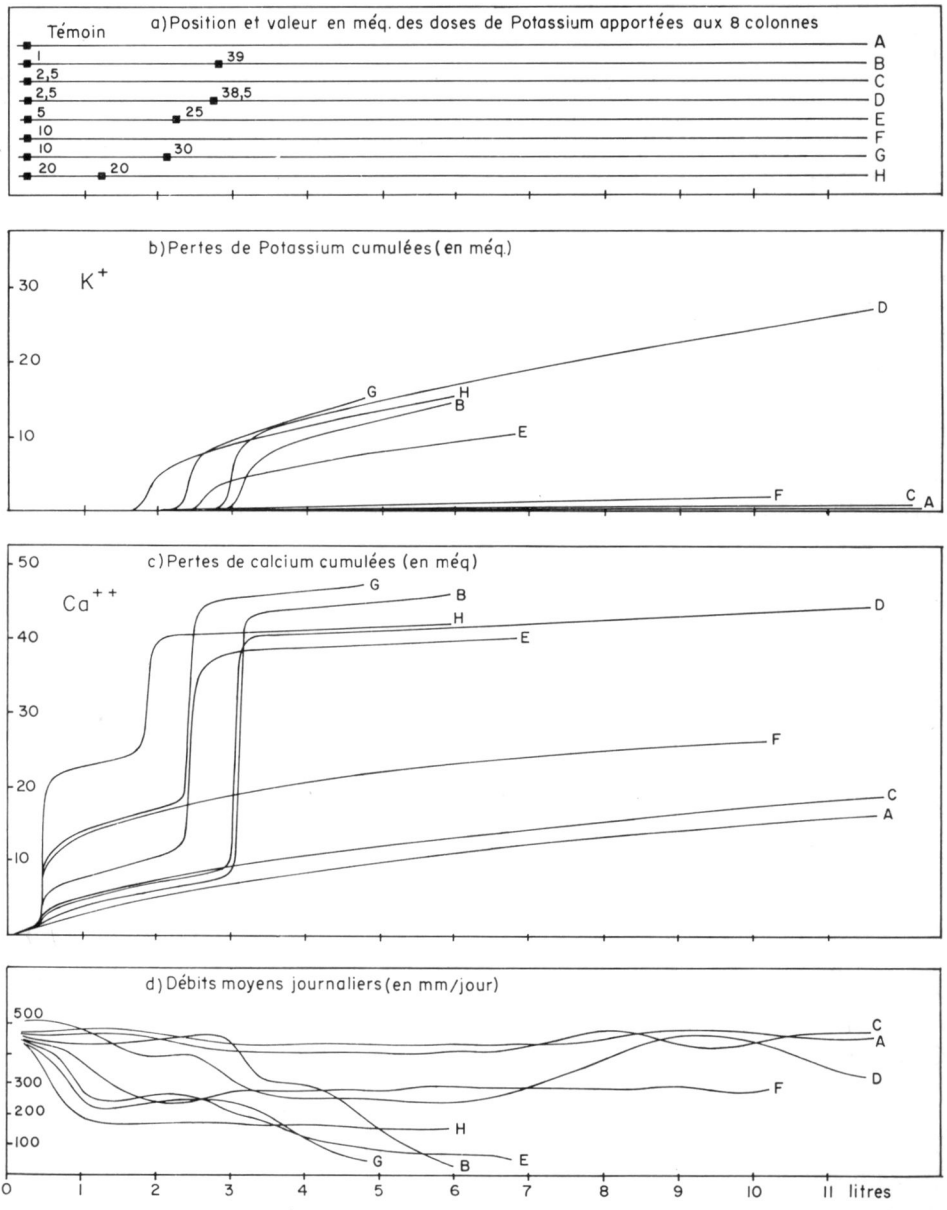



FIG. 2. — *Étude du lessivage du potassium ; première expérience*
Échelle des abscisses : volumes de percolat écoulés depuis le début de l'expérience (en litres) pour chaque colonne

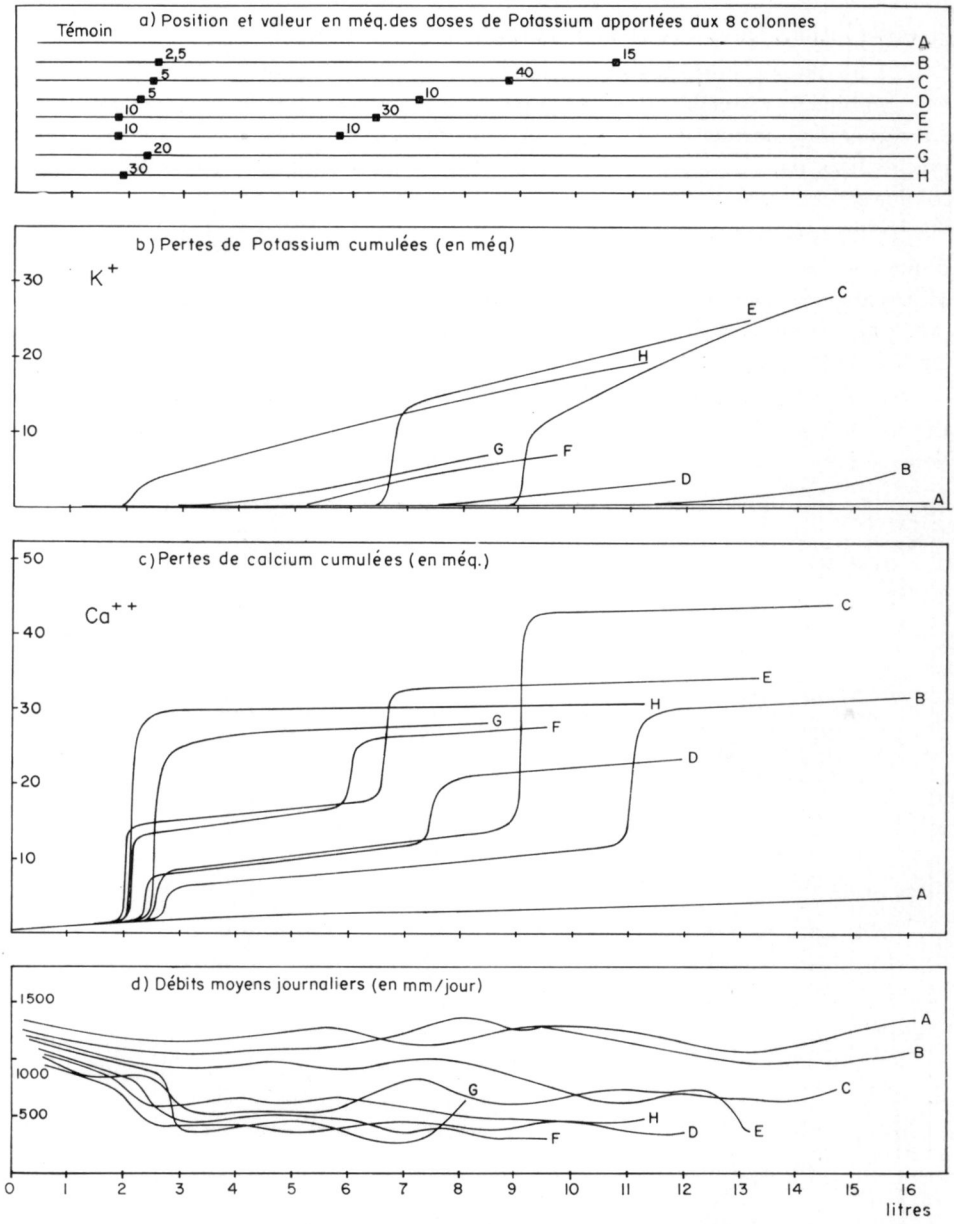



FIG. 3. — *Étude du lessivage du potassium ; seconde expérience*
Échelle des abscisses : identique à celle de la figure 2.
Les débits sont nettement plus élevés que dans la première expérience

si la solution est potassique, la saturation complète et constante de la colonne par cet élément, opération sans intérêt.

On constate sur la figure 3 que cette expérience, d'une durée de 15 jours confirme les observations faites au cours de la première :

*a*) les doses apportées, également en deux fois sur 5 colonnes, sont différentes dans leur combinaison de celles appliquées dans la première expérience, mais comme nous l'avons déjà remarqué, le sol réagit de la même manière à deux doses successives assez rapprochées dans le temps ou à leur somme appliquée en une seule fois (cas des colonnes F et G, fig. 3 *b*) ;

*b*) lorsque la dose totale dépasse 25-30 méq., soit environ 70 p. 100 de la C. E. C. d'une colonne, on note le départ immédiat de l'excès non retenu, suivi d'une perte continue de cet élément tant que dure le lessivage. C'est le cas des colonnes C, E, H, (fig. 3 *b*). Les courbes de pertes cumulées de $K^+$ et $Ca^{++}$ sont en tout point semblables à celles de la figure 2 ;

*c*) en revanche, la dissolution du calcaire, qu'on peut estimer sur les courbes « témoins A » (pertes de $Ca^{++}$) semble varier en raison inverse du débit : d'une expérience à l'autre, on relève, dans les percolats des colonnes témoins, des concentrations

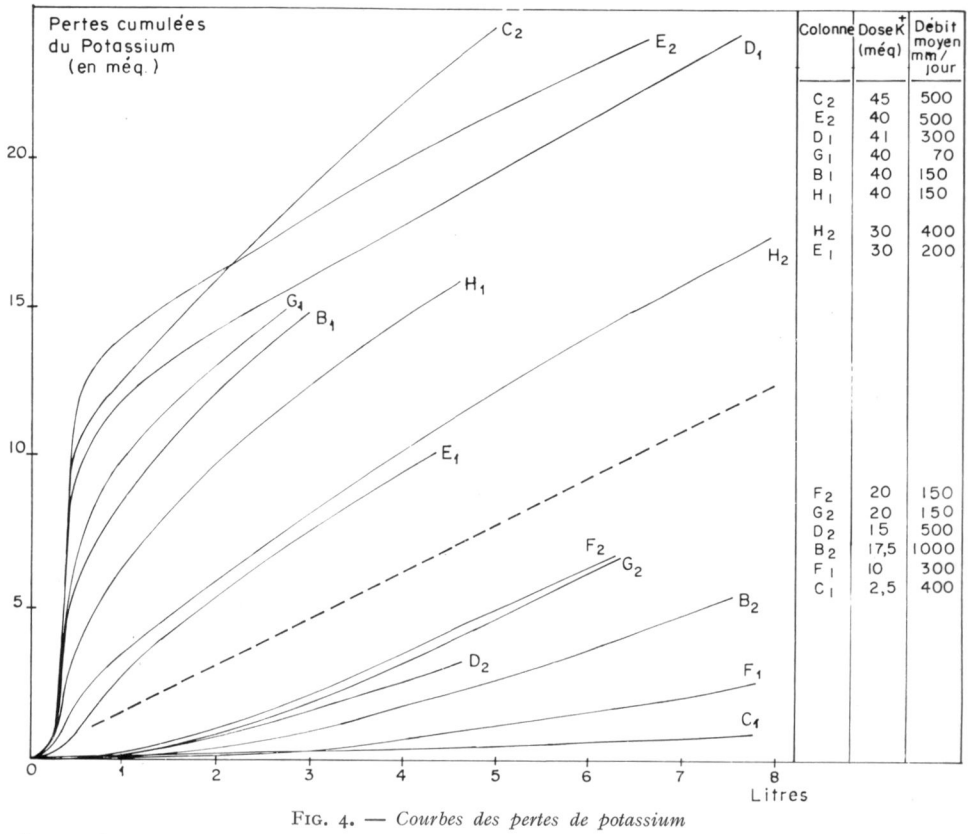



FIG. 4. — *Courbes des pertes de potassium*

Les courbes des pertes de $K^+$ des figures 2 et 3 sont groupées ici avec pour origine commune le point où chacune quitte la courbe témoin

en calcium de 0,9 et 0,5 méq/l respectivement pour des débits de l'ordre de 400 et 1 000 mm/jour.

La similitude des pertes de $K^+$ dans ces deux expériences apparaît plus nettement, si l'on groupe les courbes des figures 2 *b* et 3 *b* correspondantes, avec, pour origine commune, les abscisses respectives des apports de potassium (fig. 4). Ces courbes, asymptotiques par nature puisque les réserves de $K^+$ de chaque colonne sont limitées, semblent toutes présenter une forme sigmoïde, bien que celles qui sont placées au-dessous de la ligne pointillée n'aient pas leur point d'inflexion dans les limites de la figure.

On a porté sur la droite de ce graphique les doses appliquées et les débits de percolation en fin d'expérience : on constate que la pente de ces courbes, donc la concentration potassique des percolats, est relativement indépendante de ces deux facteurs.

3. *Par une troisième expérience, il était nécessaire de préciser,* la forme des « vagues » d'élution de $Ca^{++}$ et $K^+$, leur position relative, et de dresser le bilan anionique.

Nous avons mis en régime de percolation 6 nouvelles colonnes du même sol, d'une densité apparente de 1,4 pour trois d'entre elles, de 1,25 pour les autres et leur avons appliqué, dans chaque groupe, des doses de 15, 25, 40 méq. $K^+$ (colonnes A, B, C, d'une part et D, E, F, d'autre part, de la figure 5).

Les percolats ont été collectés par fractions de 60 ml pendant le passage des vagues. La figure 5 fait apparaître :

*a*) l'ordre de grandeur de la diffusion des ions $K^+$ et $Ca^{++}$ de part et d'autre du maximum de la vague : 80 à 90 p. 100 des ions élués dans la vague sont concentrés dans un volume de percolat de 50 ml environ ;

*b*) un décalage insignifiant des vagues des deux ions, celles de $Ca^{++}$ semblant légèrement précéder celles de $K^+$ ;

*c*) la forme symétrique des vagues de $Ca^{++}$ et asymétrique de celles de $K^+$.

La mesure des concentrations maximales doit être interprétée, quant à la précision, compte tenu du volume des fractions collectées.

En ce qui concerne les anions, l'analyse indique que les ions $Cl^-$ sont pratiquement éliminés en même temps que la vague, puis la composition anionique change rapidement : $HCO_3^-$ et $CO_3^=$ accompagnent alors les cations.

Le tableau 3 présente, à titre d'exemple, le bilan ionique de trois fractions successives, non consécutives, prélevées entre le 1$^{er}$ et 3$^e$ litre des percolats des colonnes B et C (lessivage lent) et entre le 2$^e$ et le 6$^e$ litre des colonnes E et F (lessivage rapide), c'est-à-dire après le passage des « vagues ».

*Remarque :* ce tableau ne permet pas de tirer des conclusions relatives à l'effet, sur la composition ionique des percolats, du débit et de la dose $K^+$ appliquée parce que les quatre colonnes ne sont pas au même stade de lessivage : en revanche, si l'on porte sur un même graphique (non reproduit ici), en fonction du volume écoulé, les concentrations ioniques totales et partielles, par exemple, la fraction ionique $x_K = \frac{(K)}{(K + Ca)}$ des percolats de plusieurs colonnes on constate, qu'à volume de lessivage égal :

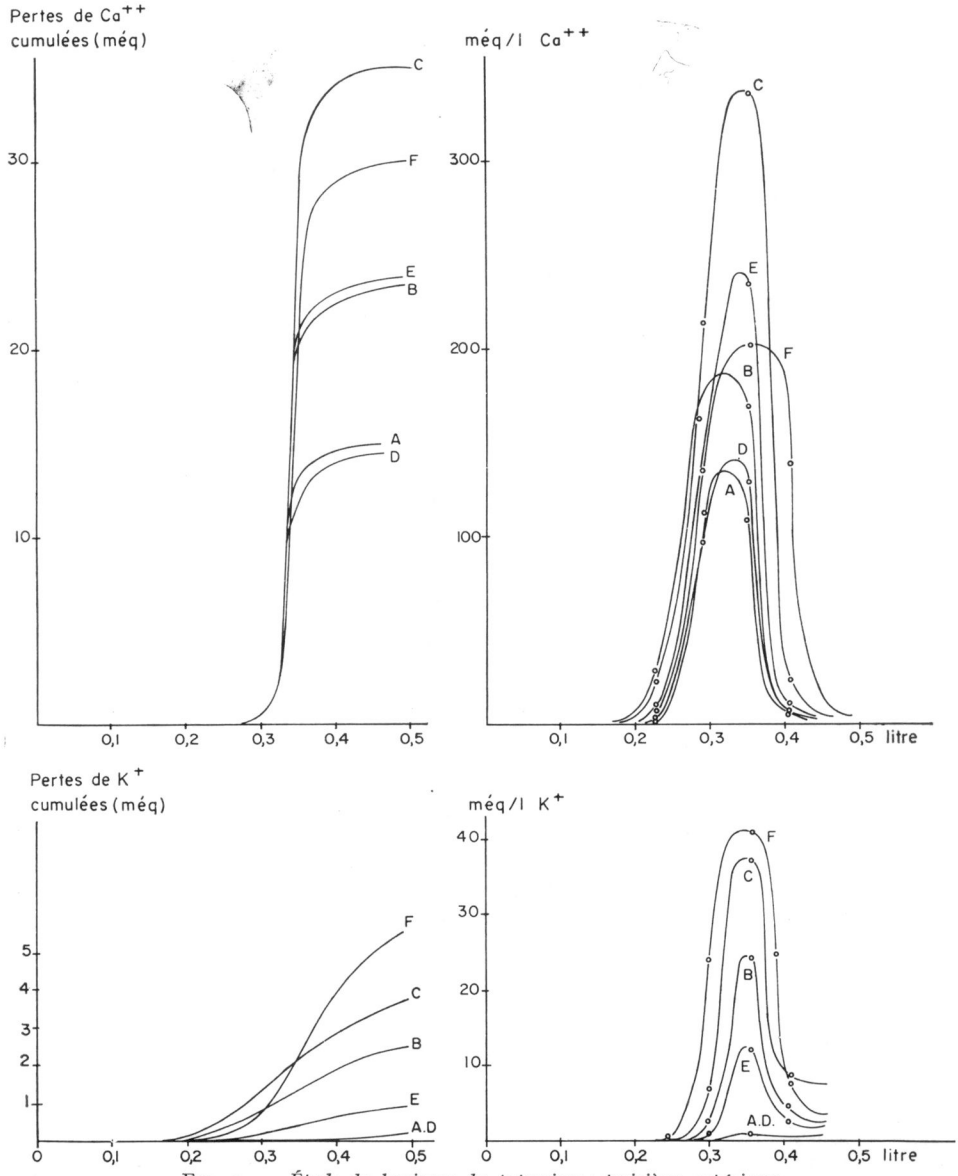



FIG. 5. — *Étude du lessivage du potassium ; troisième expérience*
*Concentration de $K^+$ et $Ca^{++}$ dans les percolats au passage des « vagues ».*
*Pertes cumulées de ces deux cations*

Échelle des abscisses : identique à celle de la figure 2

*a*) les concentrations totales et les fractions ioniques $x_K$ dépendent très peu du débit ;

*b*) ces grandeurs sont des fonctions croissantes de la dose, au début de la percolation puis leurs valeurs s'uniformisent ;

*c*) la fraction ionique $x_K$ est en général supérieure à 0,5 et augmente au cours du lessivage, au moins tant qu'il reste du potassium dans la colonne.

TABLEAU 3

*Bilan ionique de trois fractions des percolats des colonnes B, C, E, F, de la 3e expérience* (en méq/l)

| Colonnes | $Ca^{++}$ | $K^+$ | $Ca^{++} + K^+$ | $HCO_3^- + CO_3^=$ | $HCO_3^-$ | $CO_3^=$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| B | | | | | | |
| Dose $K^+$ : 25 méq. | 3,10 | 1,10 | 4,20 | 3,95 | 1,75 | 2,20 |
| Débit moyen : 250 mm/j | 1,40 | 1,45 | 2,85 | 3,25 | 1,20 | 2,00 |
| | 1,00 | 1,30 | 2,30 | 2,50 | 0,65 | 1,85 |
| C | | | | | | |
| Dose $K^+$ : 40 méq. | 1,35 | 3,90 | 5,25 | 4,75 | 1,75 | 3,00 |
| Débit moyen : 250 mm/j | 0,65 | 2,50 | 3,15 | 3,20 | 1,60 | 1,60 |
| | 0,50 | 2,15 | 2,65 | 3,50 | 1,25 | 2,25 |
| E | | | | | | |
| Dose $K^+$ : 25 méq. | 0,95 | 1,30 | 2,25 | 2,50 | 0,60 | 1,90 |
| Débit moyen : 400 mm/j | 0,35 | 1,50 | 1,85 | 1,85 | 1,40 | 0,40 |
| | 0,20 | 1,10 | 1,30 | 1,75 | 1,35 | 0,40 |
| F | | | | | | |
| Dose $K^+$ : 40 méq. | 0,75 | 2,80 | 3,55 | 3,50 | 2,40 | 1,10 |
| Débit moyen : 400 mm/j | 0,25 | 2,50 | 2,75 | 2,80 | 2,40 | 0,40 |
| | 0,15 | 1,85 | 2,00 | 2,25 | 1,10 | 1,15 |

4. *Distribution du potassium dans les colonnes à différents stades du lessivage. Étude d'une éventuelle rétrogradation.* Nous avons cherché à savoir comment se distribue le potassium retenu, du haut en bas des colonnes de sol et comment le lessivage modifie cette distribution.

Nous avons déterminé le potassium échangeable restant dans le sol à différents stades de la percolation.

La figure 6 présente les courbes de distribution de la fraction ionique $\bar{x}_K$ définie par le rapport $\frac{\text{K échangeable}}{\text{C. E. C.}}$, d'une extrémité à l'autre de 4 colonnes : les analyses sont faites sur 8 tranches équidistantes, d'environ 25 g, les tranches intermédiaires ayant servi à la mesure de l'humidité.

Nous avons calculé la quantité de potassium échangeable présent dans chaque colonne par intégration graphique et établi le bilan suivant au moment du découpage (tabl. 4) :

$K^+$ initial + $K^+$ apporté = $K^+$ échangeable restant + $K^+$ lessivé + K rétro-

gradé. Le bilan fait apparaître la rétrogradation d'environ 10 p. 100 du potassium ajouté.

Nous avons contrôlé cet effet de rétrogradation sur 6 petites colonnes du même sol, d'un poids de 25 g, traitées dans les mêmes conditions que les grandes, toutes proportions gardées : les résultats du tableau 4 sont assez bien confirmés (tabl. 5). La quantité de potassium rétrogradé à partir de la dose apportée atteint environ 10 p. 100 de la C. E. C. du sol.

TABLEAU 4

*Bilan total du potassium de quatre colonnes*

| Colonne | Poids (g) | $K^+$ échang. initial (méq.) | Dose apportée (méq.) | $K^+$ échang. restant (méq.) | $K^+$ lessivé (méq.) | $K^+$ rétrogradé (méq.) | Volume du lessivage (litres) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 000 | 0,7 | 40 | 35 | 2,5 | 3,2 | 1 |
| 2 | 1 000 | 0,7 | 40 | 29 | 5,5 | 6,2 | 1 |
| 3 | 1 000 | 0,7 | 40 | 23 | 15 | 2,7 | 6 |
| 4 | 1 000 | 0,7 | 41 | 10,5 | 27 | 4,2 | 11 |

*Remarque :* la figure 6 met en évidence un gradient vertical de distribution du potassium échangeable dans les colonnes au moment de la rétention. Il n'est pas exclu qu'un gradient radial s'y superpose : en effet, l'observation, en coupe, de colonnes dans lesquelles on fait passer des solutions de colorants non retenus (Rouge Congo ou Vert Sulfo) montre que la vitesse de déplacement *per descensum* du liquide est plus élevée au centre que sur les bords.

## DISCUSSION DES RÉSULTATS

Les résultats de ces expériences peuvent être interprétés simplement à partir de l'équilibre d'échange des ions $K^+$ et $Ca^{++}$ dans le sol (1) et de l'équilibre entre les ions $HCO^-$ et $CO^=$, qui régit, en somme, la dissolution du calcaire (2) :

$$\text{Sol} \cdot Ca^{++} + K^+ \rightleftharpoons \text{Sol} \cdot K^+ + Ca^{++} \qquad (1)$$

$$CO_3^= + CO_2 + H_2O \rightleftharpoons 2HCO_3^- \qquad (2)$$

Deux phénomènes bien distincts se succèdent lorsque la dose de potassium pénètre dans le sol calcaire :

1. *D'abord l'élution*, par échange ionique, d'une quantité de $Ca^{++}$ égale à la quantité d'ions $K^+$ retenus par le sol, cette élution pouvant éliminer en même temps un éventuel excès d'ions $K^+$ non retenus (lorsque la dose dépasse 70 à 80 p. 100 de la C. E. C.).

Le contact entre le sol initial pratiquement saturé d'ions $Ca^{++}$ et la solution concentrée de KCl provoque un déplacement vers la droite de l'équilibre (1) ; mais progressivement, l'échange libère des ions $Ca^{++}$ et retient des ions $K^+$, modifiant la composition de cette solution ; par suite, il se ralentit lui-même au fur et à mesure

TABLEAU 5

*Rétrogradation du potassium dans le sol étudié* (en méq)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $K^+$ initial ..... | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 |
| $K^+$ apporté..... | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| $K^+$ lessivé (excès)..... | 0,370 | 0,280 | 0,350 | 0,300 | 0,320 | 0,190 |
| $K^+$ échangeable..... | 0,580 | 0,600 | 0,550 | 0,590 | 0,560 | 0,710 |
| après contact pendant ..... | 5 j | 5 j | 10 j | 10 j | 15 j | 15 j |
| $K^+$ rétrogradé ..... | 0,07 | 0,14 | 0,12 | 0,13 | 0,14 | 0,12 |
| Rétrogradation rapportée à 1 000 g de sol ..... | 2,7 | 5,5 | 4,7 | 5,1 | 5,5 | 4,7 |

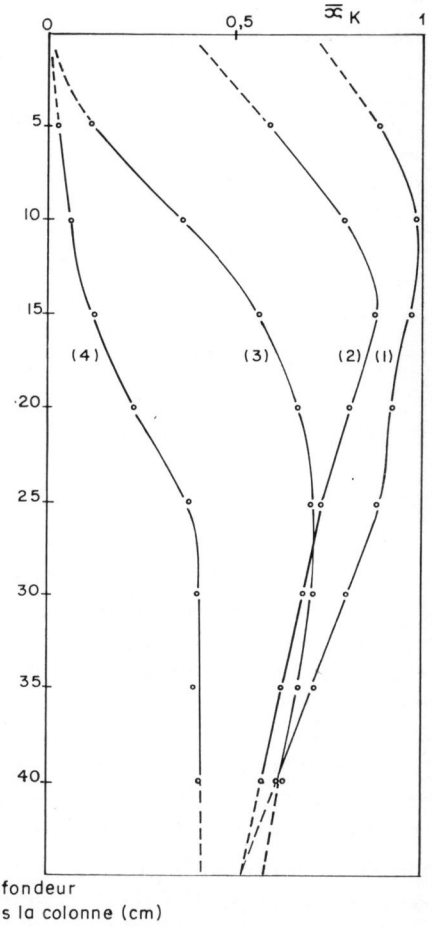



FIG. 6. — *Distribution de K échangeable dans les colonnes à différents stades du lessivage, en fonction de la profondeur*

Les extrémités des courbes en pointillé sont extrapolées

$$\bar{x}_K = \frac{\text{K échangeable}}{\text{C. E. C.}}$$

que cette tranche de solution ionique descend dans la colonne, si bien que dans la partie inférieure la fraction ionique adsorbée, $\bar{x}_K$ ne dépasse pas 0,5 — 0,6 (cf. fig. 6 : courbes 1 et 2). On peut définir un rendement de la rétention, caractéristique de cette première phase par $R\gamma = \frac{K^+ \text{ retenu}}{K^+ \text{ apporté}}$.

La figure 7 donne pour l'ensemble des expériences, la valeur de $R\gamma$ en fonction du rapport $\frac{\text{K apporté}}{\text{C. E. C.}}$.

Dans ces conditions expérimentales, le rendement de la rétention est de 100 p. 100 jusqu'à des doses extrêmement élevées équivalentes à 5 tonnes $K_2O$ à l'hectare et ne s'abaisse à 80 p. 100 qu'au-delà de doses doubles.

Cette première phase peut être considérée comme terminée avec l'élimination des ions $Ca^{++}$ déplacés, des ions $K^+$ éventuellement en excès et des ions $Cl^-$.

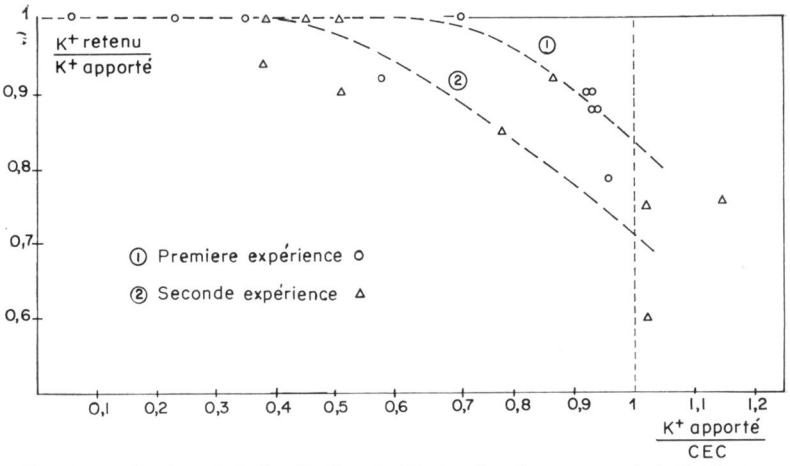



FIG. 7. — *Rendement de la rétention de $K^+$ par le sol, au moment de l'apport, en fonction de la dose, exprimée en fraction de la C. E. C. de la colonne*

2. *La seconde phase,* caractérisée par la présence des anions $HCO_3^-$ et $CO_3^=$ et par la valeur élevée de la fraction ionique $x_K$ dans le percolat peut s'expliquer ainsi : le gaz carbonique produit par fermentation dans le sol, met en solution du bicarbonate de calcium aux dépens du calcaire (déplacement vers la droite de l'équilibre 2). Cette solution calcique, au contact du sol saturé d'ions $K^+$ déplace cette fois l'équilibre (1) vers la gauche : les ions $Ca^{++}$ reprennent place sur les sites d'absorption, en raison de leur énergie de rétention supérieure et c'est un percolat relativement riche en potassium et pauvre en calcium qui s'écoule.

Les observations suivantes confirment cette hypothèse :

*a*) le gaz carbonique de l'eau permutée (environ 0,2 méq/l sous forme $HCO_3^-$) est en quantité nettement insuffisante pour assurer dans les percolats les teneurs en anions que nous avons relevées (tabl. 3) : le sol fournit donc la majeure partie de ce gaz ;

*b*) si nous remplaçons momentanément l'eau permutée par une solution de gaz carbonique maintenue à saturation, les concentrations respectives de $K^+$ et $Ca^{++}$

dans le percolat d'une colonne choisie au hasard (F de la 3e expérience) passent de 1,85 et 0,15 à 12,7 et 3,5 ;

*c*) nous avons noté, à propos des colonnes témoins A, que la dissolution du calcaire semble varier en raison inverse du débit de lessivage, ce qui conduit à admettre que la quantité de gaz carbonique produit par le sol est une fonction linéaire du temps, pendant la durée de l'expérience ;

*Remarque :* il est possible que le percolat ne contienne que des bicarbonates à la sortie des colonnes et qu'au contact avec l'atmosphère, la réaction (2) soit partiellement déplacée vers la gauche, donnant naissance à des ions $CO_3^=$. Les solutions de bicarbonates de K et surtout de $Ca^{++}$ sont instables. Il peut être utile de rappeler à ce propos, les proportions des formes $H_2CO_3$, $HCO_3^-$, $CO_3^=$ en solution aqueuse en fonction du pH, dans le système $CaCO_3$, $CO_2$, $H_2O$ (fig. 8).

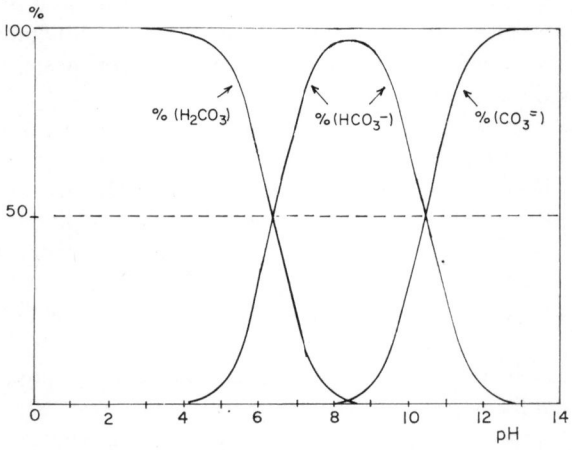



FIG. 8. — *Pourcentage en solution aqueuse des trois formes $H_2CO_3$, $HCO_3^-$, $CO_3^=$ en fonction du pH, dans le système $CaCO_3$, $CO_2$, $H_2O$*

*d*) la figure 6 montre que cette seconde phase de réactions débute à la partie supérieure de la colonne et se propage du haut vers le bas au fur et à mesure de l'élimination du potassium. Il ne faudrait pas en conclure que la formation de $CO_2$ est plus intense en haut de la colonne : rien ne le laisse supposer. Ce processus de désorption de $K^+$ s'explique plutôt comme celui de sa rétention dans la première phase : au cours de son mouvement *per descensum* dans la colonne, la solution de bicarbonates, dont on admet qu'elle se forme dans toute la masse du sol, perd des ions $Ca^{++}$ et s'enrichit d'autant en ions $K^+$. Le déplacement vers la gauche de l'équilibre (1) se ralentit donc de lui-même : ce n'est donc que lorsque les couches supérieures ont perdu la majeure partie de leur réserve de potassium, que la désorption peut gagner progressivement les couches inférieures.

*Remarque :* le tracé des isothermes d'échange du couple $K^+$-$Ca^{++}$ du sol étudié permettrait une interprétation générale plus facile de ces déplacements d'équilibre : dans la représentation actuelle (HELFFERICH, 1962), une isotherme donne, en effet, pour une température donnée et une concentration cationique totale constante de la solution calco-potassique en équilibre avec le sol, les valeurs de $\bar{x}_K$ en fonction

des valeurs de $x_K$ ($x_K$ variant entre 0 et 1), c'est-à-dire la fraction ionique d'un des deux ions dans la phase adsorbante en fonction de sa fraction ionique dans la phase liquide.

L'établissement de ces isothermes et les nombreuses conclusions qu'on peut en tirer dans l'étude de ce sol pourront faire l'objet d'une note ultérieure.

## CONCLUSIONS

Le lessivage a révélé et accentué le double déplacement de l'équilibre d'échange (1). L'eau servant de vecteur, nous avons réalisé, en quelque sorte, une chromatographie des produits des réactions successives.

Il est à noter cependant que ce lessivage à l'eau n'existe pas à proprement parler dans le cas pratique dont nous avons fait état au début de ce mémoire : si les urines des troupeaux en pâture migrent effectivement très vite dans le sol, elles ne sont pas, en général, suivies d'un apport considérable d'eau pure.

Comme nous l'avons vu, le potassium peut se perdre en profondeur, soit par défaut de rétention, soit par désorption.

La restitution défectueuse de $K^+$ par les urines tient sans doute surtout à un rendement de rétention faible ; bien que nous n'ayons pas pu mettre en évidence l'effet du débit de lessivage, faute de pouvoir atteindre des valeurs très élevées de ce paramètre, nous pensons qu'il s'agit d'un facteur décisif quant à la qualité et à la durée du contact entre le sol et la solution potassique, donc au rendement de la rétention.

Il conviendrait de déterminer, par exemple, la porosité moyenne de plusieurs sols de prairie ameublis et fissurés par les racines et la faune terricole.

D'après la disposition probable des isothermes, on peut aussi retenir, sous réserves, que la concentration de la solution potassique apportée au sol est aussi un facteur, quoique moins important, de ce rendement, et penser qu'à dose égale, la rétention est d'autant meilleure que la solution est plus concentrée.

La seconde phase, mise en évidence par ce lessivage continu, implique principalement les facteurs suivants :

*a*) la présence du calcaire, comme source d'ions $Ca^{++}$ dans toute la masse du sol. Certains travaux (CLAIRON, 1969) laissent supposer, qu'en sol acide, les ions $H^+$ jouent un rôle analogue aux ions $Ca^{++}$ des sols calcaires, à l'égard de l'élimination du potassium adsorbé ;

*b*) le lessivage lui-même, qui place constamment le système « solide-liquide » hors d'équilibre ;

*c*) la production de gaz carbonique, sous l'effet de la fermentation.

Cette seconde phase expérimentale provoque des pertes de potassium, qui sont directement liées au volume du liquide de lessivage, mais relativement indépendantes des débits de percolation, et qui semblent en mesure d'épuiser la totalité du stock d'ions $K^+$ adsorbés.

Ces conclusions, qui s'appliquent aux masses relativement importantes de nos colonnes de sol, soumises à une fertilisation et à un lessivage exceptionnels, sont

d'ailleurs valables, toutes proportions gardées, dans le cas de la fertilisation normale, au niveau des agrégats de sol, en particulier aux points d'impact des granules d'engrais.

En définitive, si dans une prairie pâturée, il est logique de parler de restitution du potassium par l'intermédiaire des déjections des animaux, les conditions de cet apport font que l'efficacité de cette restitution dépendra dans une large mesure des propriétés du sol et de l'importance de son drainage.

*Reçu pour publication en février 1970.*

## REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement nos collègues du Laboratoire de Minéralogie de l'École supérieure de Chimie de Mulhouse pour leur aide dans l'analyse de la fraction argileuse du sol étudié.

## SUMMARY

### EXPERIMENTAL STUDY OF THE RETENTION OF LARGE AMOUNTS OF POTASSIUM IN A CALCAREOUS SOIL SUBJECTED TO HEAVY LEACHING

In these experiments, homogeneous samples of about 1 kg of a calcareous soil were placed in percolation tubes and received different heavy doses of potassium chloride, which may reach the value of their cation exchange capacity (C. E. C.).

The leaching of these columns with pure water, at the rate of several hundred mm per day, shows that the adsorption of the $K^+$ ions is followed by a phase of desorption. The adsorption ratio $\frac{K^+ \text{ retained}}{K^k \text{ brought}}$ is particularly high.

It seems to be established that the desorption of $K^+$ results from the exchange with $Ca^{++}$ ions originating in the dissolution of the calcareous by $CO_2$, which forms in the soil.

These results can be used to evaluate the potassium restitutions through the dejections of herds on pasture.

## ZUSAMMENFASSUNG

### EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES ZURÜCKHALTENS VON BEDEUTENDEN KALIUMMENGEN DURCH EINEN KALKHALTIGEN, EINER INTENSIVEN AUSLAUGUNG UNTERWORFENEN BODEN

Einem in Sickerungsröhren eingefüllten, kalkhaltigen Boden wurden verschiedene grossen Mengen Kaliumchlorid verabreicht, welche bis zur Sättigung seiner Kationenaustauschkapazitäs (K. A. K.) reichen konnten.

Unterwirft man diese Säulen einer Auslaugung durch reines Wasser (mehrere hundert mm/Tag) so reagiert der Boden gegenüber der $K^+$ Ionen zuerst durch eine Adsorption, dann durch eine Desorption.

Der Adsorptionswirkungsgrad $\frac{\text{Zurückgehaltener } K^+}{\text{Zugeführter } K^+}$ ist besonders hoch.

Was die Desorption anbetrifft, so erscheint es bewiesen, dass sie durch den Austausch mit den $Ca^{++}$ Ionen hervorgerufen wird, welche aus der Lösung des Karbonatgestein durch den im Boden sich bildenden $CO_2$ stammen.

Diese Schlussfolgerungen erlauben die Bedingungen, zubeurteilen, welche die Kaliumrestitution durch die auf kalkhaltigen Boden weidenden Herden leiten.

## РЕЗЮМЕ

*Экспериментальное изучение удержания массивных доз калия известковой почвой подверженной интенсивному выщелачиванию.*

Ж. П. АНДРЭ.

Однородные пробы, в 1 кг. приблизительно, известковой почвы, помещенные в кипятильные колонки, обрабатывались массивными дозами солянокислого калия, достигавшими уровня емкости обмена катионами этих проб.

Производя затем их выщелачивание с помощью нескольких сотен мм. чистой воды в день, можно доказать что реакция почвы в отношении ионов $K^+$ заключает два периода : адсорбция и следующая за ней десорбция.

Продуктивность адсорбции $\frac{K^+ \text{ удержанный}}{K \text{ внесенный}}$ очень велика. Что-же касается десорбции, можно считать установленным что она вызывается ионами $Ca^{++}$ известняка почвы растворенными углекислым газом образующимся в ней.

Эти выводы могут быть использованы при суждении об условиях реституции калия в почву в форме испражнений, пасущимися на ней стадами.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Anne P., Marocke R., 1964. Observations sur la fixation du potassium par le sol et sur la libération du potassium fixé. *8e Congr. intern. Science Sol*, Bucarest, 325-329.

Bastisse E. M., 1951. Dix-huit années d'études lysimétriques appliquées à l'Agronomie. Premier mémoire. *Ann. agron.*, 727-781.

Bastisse E. M., 1953. Dix-huit années d'études lysimétriques appliquées à l'Agronomie. Deuxième mémoire. Exportation des éléments chimiques $K_2O$, $P_2O_5$. *Ann. agron.*, **19**, 331-378.

Bastisse E. M., Hénin S., 1955. Dix-huit années d'études lysimétriques appliquées à l'Agronomie. Troisième mémoire. *Ann. agron.*, **21**, 203-232.

Clairon M., 1969. Étude expérimentale de l'influence du chaulage sur la mobilité du magnésium et du potassium dans deux types de sols acides. *Bull. A. F. E. S.*, **2**.

Collier D., Robelin M., 1959. Contribution à l'étude de la dynamique de l'eau et des substances chimiques dans les sols argilo-calcaires de Limagne. Résultats de quatre années d'observations lysimétriques. *Ann. agron.*, **4**, 415-453.

Coppenet M., 1969. Résultats de douze années d'observations lysimétriques à Quimper (1954-1965) *Ann. agron.*, **2**, 111-143.

Courau M., 1969. Étude expérimentale de la circulation de l'eau saturante dans les milieux poreux artificiels. *Ann. agron.*, **1**, 5-14.

Demolon A., 1960. *Dynamique du sol*, 520 p., Dunod, Paris.

Der Katchadourian L., 1955. *L'exploitation intensive des prairies*, 60-62, Hachette, Paris.

Feodoroff A., 1965. Étude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante. *Ann. agron.*, **2**, 127-175.

Helfferich F., 1962. *Ion Exchange*, 624 p., McGraw Hill Book Co, New York.

Jouis E., Hangard E., 1955. Étude sur les purins de la Seine-Maritime. *Ann. agron.*, **2**, 301-309.

Techniques agricoles, 1960. t. II, 4120, 6-7. *Techniques agricoles*, Paris.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (2), 229-236.

NOTE ANALYTIQUE

# MINÉRALISATION DES TISSUS VÉGÉTAUX EN VUE DU DOSAGE DE P, K, Ca, Mg, Na

P. MORARD et J.-L. GULLO
avec la collaboration technique de M. COUVRAND

*Laboratoire de Physiologie végétale appliquée,*
*École nationale supérieure agronomique, 145, Avenue de Muret, 31 - Toulouse.*

## RÉSUMÉ

La comparaison de différentes techniques de minéralisation a montré l'intérêt d'une calcination après prétraitement de la matière végétale par deux millilitres d'acide nitrique concentré. La méthode mise au point permet de doser le phosphore par colorimétrie, le potassium, le calcium, le magnésium et le sodium par spectrophotométrie d'absorption atomique à partir d'une seule prise d'essai d'environ 200 milligrammes de poudre végétale sèche.

## INTRODUCTION

L'évolution actuelle de l'agriculture nécessite le recours de plus en plus fréquent aux analyses de laboratoire. Ainsi, pour les végétaux, la détermination de la teneur en éléments minéraux à certains stades de végétation en vue d'examiner et d'améliorer la nutrition de la plante (diagnostic foliaire) est une technique utilisée notamment dans les vergers et les vignobles ; de même, il est nécessaire de connaître la composition en éléments minéraux de certains végétaux entrant dans la constitution d'aliments concentrés pour l'alimentation animale.

Ces déterminations nécessitent d'une part, la mise au point de techniques de dosages en série notamment quant à la minéralisation, comme l'ont montré CHAT (1966) et JURION (1968), d'autre part l'utilisation de méthodes sensibles d'analyse, en particulier la spectrophotométrie d'absorption atomique (BRECH, 1968).

Classiquement on utilise une minéralisation par voie sèche (calcination) pour la détermination des cations (potassium, calcium, magnésium, sodium...), la minéralisation par voie humide (attaque par les acides à chaud) étant employée de préférence pour le dosage de l'azote et du phosphore. Nous avons cherché à n'utiliser qu'une seule minéralisation, soit humide, soit sèche, pour doser tous ces éléments, sauf l'azote, la teneur en cet élément étant déterminée à l'aide d'un ana-

lyseur automatique Coleman directement sur la poudre végétale. Le problème qui se posait était le suivant : déterminer P, K, Ca, Mg, Na, soit à partir d'une minéralisation humide par l'acide sulfurique, dans ce cas la détermination de Na et Ca s'avérait difficile, soit à partir d'une minéralisation sèche, et la détermination du P risquait alors d'être délicate. Après de nombreux essais, nous avons adopté la deuxième solution et dosé les 5 éléments à partir d'une seule calcination, car cette méthode se prête bien aux analyses en série.

Le deuxième but de ce travail a été d'essayer d'abaisser le poids de l'échantillon végétal utilisé lors de la calcination tout en conservant la précision optimale des mesures : nous sommes ainsi arrivés à ne prendre que 200 mg de poudre végétale alors que la majorité des méthodes proposées nécessitent entre 1 et 2 g (FIORAMONTI et coll., 1964 ; JURION, 1968 ; CHAT, 1966).

## MINÉRALISATION

Malgré l'évolution des techniques d'analyse, la minéralisation des échantillons végétaux reste un point délicat.

Nous avons utilisé les deux types classiques :

— une minéralisation humide $T_1$ (attaque Kjeldahl) utilisée ici comme référence pour le dosage du phosphore ;

— une minéralisation sèche : nous avons essayé plusieurs protocoles expérimentaux $T_2$, $T_3$, $T_4$, $T_5$.

Les détails techniques de ces diverses minéralisations sont les suivants :

### 1. *Minéralisation par voie humide* ($T_1$)

Dans un matras Kjeldahl de 100 ml, on introduit 200 mg de matière sèche végétale pulvérisée. On ajoute 5 ml d'acide sulfurique concentré et 2 ml d'une solution sulfurique au sélénium (le catalyseur au sélénium est préparé en faisant « digérer » 0,6 g de sélénium par 10 ml d'acide sulfurique et en complétant après ébullition à 100 ml). On porte ensuite à ébullition pendant deux heures en veillant à ce qu'il ne se produise pas de projections et en conduisant le chauffage de manière à éviter une évaporation à sec. Après refroidissement, le résidu de l'attaque et les eaux de lavage sont recueillis dans une fiole jaugée de 200 ml.

### 2. *Calcination* ($T_2$, $T_3$, $T_4$, $T_5$).

Certaines techniques de minéralisation par voie sèche préconisent l'addition de sels minéraux ($KNO_3$, $MgCO_3$, $Na_2CO_3$...) à la poudre végétale avant le passage au four. La calcination après addition de ces mélanges, le plus souvent nitro-alcalins, porte aussi le nom de fusion alcaline (BRUNEL, 1948).

Les différences entre nos diverses calcinations $T_2$, $T_3$, $T_4$ et $T_5$ viennent de modifications apportées par différents prétraitements avant la calcination proprement dite :

— $T_2$ : calcination sans prétraitement ;

— $T_3$ : prédigestion de la poudre végétale par 1 millilitre d'acide nitrique concentré suivie d'une évaporation à sec sur plaque chauffante ;

— $T_4$ : même protocole expérimental que pour $T_3$ mais avec 2 millilitres du même acide ;

— $T_5$ : traitement de la poudre végétale par 1 millilitre d'une solution de nitrate de magnésium 2M et évaporation à sec.

Nous avons tout d'abord utilisé le prétraitement $T_5$, méthode préconisée par FIORAMONTI et coll. (1964), pour la calcination en vue du dosage du soufre chez les végétaux, mais l'addition de

nitrate de magnésium rend impossible le dosage ultérieur de cet alcalino-terreux. C'est pourquoi nous avons ensuite essayé une prédigestion de la poudre par différentes doses d'acide nitrique concentré (CHARLOT, 1961).

Dans tous les cas, on utilise des creusets en silice dans lesquels on introduit 200 milligrammes de poudre végétale. Les prétraitements s'effectuent dans les creusets qui sont, ensuite, recouverts d'un couvercle en silice et introduits dans un four électrique dans lequel la température augmente progressivement par paliers jusqu'à 500°C. On maintient cette température au minimum pendant 6 heures. Après refroidissement, les cendres obtenues sont solubilisées d'abord par 0,5 ml d'eau oxygénée (110 volumes), puis par 2 ml d'acide chlorhydrique concentré ; après chaque opération, on évapore à sec sur plaque chauffante à 105°C. On reprend enfin par 5 ml d'acide chlorhydrique dilué au 1/10, on filtre pour retenir la silice s'il y a lieu, et on recueille dans une fiole jaugée.

## DOSAGES

Le phosphore est dosé par une méthode colorimétrique basée sur la réduction d'un complexe phosphomolybdique par le sulfate d'hydrazine (LACROIX, 1955). Si les solutions d'attaque sont trop acides (ce qui est le cas ici uniquement dans la minéralisation humide), il est nécessaire de faire une neutralisation préalable afin que l'acidité finale soit comprise entre 0,25 et 0,75 N en acide sulfurique. Les lectures des densité optiques sont effectuées à 830 mμ.

Les dosages de potassium, sodium, magnésium et calcium sont effectués par spectrophotométrie d'absorption atomique. La détermination du calcium par cette méthode nécessite l'addition de chlorure de lanthane à 5 p. 100 à la solution d'attaque pour éviter les interférences de certaines substances, en particulier des phosphates (PERKIN-ELMER, 1964).

La teneur en azote total est déterminée à l'aide d'un analyseur automatique Coleman. On pèse au centième de milligramme une quantité de poudre sèche de l'ordre de 5 à 10 milligrammes. On effectue au minimum 2 dosages sur chaque échantillon.

## ÉTUDE DE LA MINÉRALISATION

Nous avions l'intention de doser P, K, Ca, Mg et Na à partir d'une seule calcination de l'échantillon végétal, ce qui, *a priori*, ne présente pas de difficultés pour les cations ; cependant, il y a lieu d'étudier les effets de cette technique sur le dosage du phosphore. Dans ce but, nous avons effectué 8 minéralisations d'une même poudre végétale (graines de sorgho) pour chacune des différentes méthodes détaillées précédemment en les comparant à l'attaque par voie humide par l'acide sulfurique.

Les résultats des dosages du phosphore consignés dans le tableau 1, font apparaître que :

1° les calcinations $T_2$, $T_4$, $T_5$ sont plus précises puisque l'intervalle de confiance est plus étroit que pour les minéralisations $T_1$ et $T_3$ ;

2° les calcinations $T_2$, $T_3$, $T_4$, $T_5$ donnent de meilleurs résultats que la minéralisation par voie humide $T_1$ : on obtient dans tous les cas des différences significatives au seuil $P = 0{,}05$ ;

3° en comparant les différents types de calcinations entre elles, la calcination $T_4$ donne des résultats statistiquement supérieurs aux traitements $T_2$, $T_3$ et $T_5$ ; les différences sont significatives au seuil 0,05 p. 100.

TABLEAU I

*Comparaison de différentes méthodes de minéralisation d'une même poudre végétale pour le dosage du phosphore.*

(Graines de Sorgho, P en p. 100 de matière sèche)

| $T_1$ = minéralisation humide ($H_2SO_4$) | $T_2$ = calcination | $T_3$ = calcination et 1 ml $HNO_3$ | $T_4$ = calcination et 2 ml $HNO_3$ | $T_4$ = calcination et Mg $(NO_3)_2$ |
|---|---|---|---|---|
| 0,343 | 0,351 | 0,336 | 0,380 | 0,377 |
| 0,339 | 0,369 | 0,340 | 0,384 | 0,373 |
| 0,339 | 0,344 | 0,356 | 0,388 | 0,373 |
| 0,316 | 0,360 | 0,358 | 0,409 | 0,388 |
| 0,364 | 0,370 | 0,354 | 0,380 | 0,369 |
| 0,338 | 0,367 | 0,361 | 0,382 | 0,360 |
| 0,351 | 0,365 | 0,362 | 0,385 | 0,369 |
| 0,338 | 0,359 | 0,372 | 0,381 | 0,372 |
| $\bar{x} = 0{,}341 \pm 0{,}011$ (*a*) | $\bar{x} = 0{,}361 \pm 0{,}008$ (*b*) | $\bar{x} = 0{,}355 \pm 0{,}010$ (*b*) | $\bar{x} = 0{,}386 \pm 0{,}008$ (*c*) | $\bar{x} = 0{,}373 \pm 0{,}007$ (*b*) |

Les moyennes $\bar{x}$ qui ne sont pas affectées des mêmes lettres diffèrent au seuil P = 0,05.

La calcination $T_4$, avec prétraitement de la poudre végétale par 2 millilitres d'acide nitrique, peut être considérée comme donnant les meilleurs résultats aussi bien en valeur absolue qu'en précision et en reproductibilité. Le prétraitement à l'acide nitrique et l'augmentation progressive de la température du four jusqu'à 500°C empêchent d'éventuelles « pertes en phosphore », selon une expression fréquemment employée, et surtout évitent la formation de pyrophosphates à partir d'orthophosphates lesquels sont seuls dosables par les techniques colorimétriques classiques (MAZOYER, 1963). C'est donc cette calcination qui a été adoptée pour toutes nos minéralisations d'échantillons végétaux et en particulier dans la suite de ce travail.

## REPRODUCTIBILITÉ ET CONTRÔLE DES MÉTHODES D'ANALYSE

Cette méthode de calcination (avec prétraitement de la poudre végétale par 2 millilitres d'acide nitrique) a été appliquée au dosage d'un certain nombre d'éléments dans divers végétaux. Il était nécessaire, compte tenu du fait que la prise d'essai d'échantillon végétal est de l'ordre de 200 milligrammes, d'évaluer la précision des techniques analytiques utilisées. Nous donnons dans le tableau 2 les moyennes des résultats des dosages du phosphore, du potassium, du calcium, du magnésium et du sodium effectués à partir de 11 calcinations de poudres végétales. Nous avons choisi comme matériel végétal des feuilles et des racines de sorgho, ces dernières étant

TABLEAU 2

*Dosages de P, K, Ca, Mg, Na, N dans un même échantillon végétal*
(feuilles et racines de sorgho)
Moyennes des résultats de 11 répétitions exprimés en p. 100 de matière sèche.

| | Feuilles | | Racines | |
|---|---|---|---|---|
| | Calcination | Minéralisation $H_2SO_4$ | Calcination | Minéralisation $H_2SO_4$ |
| P | 0,288 $\pm$ 0,008<br>C = 4,44 | 0,279 $\pm$ 0,012<br>C = 6,40 | 0,653 $\pm$ 0,013<br>C = 3,05 | 0,664 $\pm$ 0,019<br>C = 4,43 |
| K | 2,318 $\pm$ 0,017<br>C = 1,08 | 2,603 $\pm$ 0,013<br>C = 0,73 | 6,331 $\pm$ 0,032<br>C = 6,79 | 6,685 $\pm$ 0,029<br>C = 6,35 |
| Ca | 0,719 $\pm$ 0,021<br>C = 4,47 | 0,166 $\pm$ 0,025<br>C = 22,19 | 1,076 $\pm$ 0,058<br>C = 2,53 | 0,279 $\pm$ 0,075<br>C = 12,58 |
| Mg | 0,304 $\pm$ 0,003<br>C = 1,36 | 0,315 $\pm$ 0,002<br>C = 0,96 | 0,192 $\pm$ 0,003<br>C = 2,31 | 0,201 $\pm$ 0,006<br>C = 4,22 |
| Na | 0,006 $\pm$ 0,001<br>C = 25,25 | 0,027 $\pm$ 0,023<br>C = 40,22 | 0,050 $\pm$ 0,007<br>C = 6,60 | 0,102 $\pm$ 0,059<br>C = 27,29 |
| N | Analyseur Coleman<br>2,69 $\pm$ 0,06<br>C = 0,20 | | Analyseur Coleman<br>1,83 $\pm$ 0,04<br>C = 0,14 | |

P = 0,05 C = Coefficient de variation en p. 100.

généralement assez difficiles à minéraliser. Dans le tableau 2, sont portées, en outre, les moyennes des résultats de 11 minéralisations réalisées par voie humide à l'acide sulfurique à partir du même matériel végétal dans le but d'étudier la répercussion de cette attaque sur le dosage des autres éléments et l'importance de la cession de certains éléments par le verre des matras au cours de la minéralisation. A la fin de ce tableau sont indiquées les moyennes des résultats de 11 déterminations de l'azote total par l'analyseur automatique Coleman.

La lecture du tableau 2, en considérant les résultats obtenus par élément, met en relief les points suivants :

*Phosphore*

Conformément aux résultats précédemment obtenus (tabl. 1) la calcination se révèle plus précise que la minéralisation à l'acide sulfurique (intervalle de confiance plus étroit, coefficient de variation plus faible).

*Potassium*

On note ici une meilleure reproductibilité des mesures pour les feuilles avec les deux attaques, qui donnent d'ailleurs des résultats assez semblables.

*Calcium*

Les résultats des dosages du calcium sur des attaques sulfuriques de poudres de feuilles et de racines font apparaître de très importantes fluctuations malgré l'addition de chlorure de lanthane aux solutions à doser. Par contre, les résultats des calcinations sont homogènes et surtout beaucoup plus élevés en valeur absolue. L'explication réside dans un effet dépressif extrêmement marqué de l'acide sulfurique sur le dosage du calcium par spectrophotométrie d'absorption atomique. En effet, l'addition de 5 millilitres d'acide sulfurique concentré par litre entraîne pour une solution contenant 5 milligrammes par litre de calcium un effet dépressif de 75 p. 100 et la quantité d'acide sulfurique retrouvée dans les matras après la minéralisation (environ 20 millilitres d'acide sulfurique concentré par litre de solution d'attaque) ne permet, pour une solution de calcium à 5 mg/l, de retrouver cet élément au dosage qu'à l'état de traces. La quantité d'acide sulfurique retrouvée après minéralisation étant variable, il est difficile d'obtenir des mesures fidèles, d'autant qu'à cette dose, l'effet dépressif est presque total. Cet effet, qui avait été signalé pour la spectrophotométrie d'émission, a également été mis en évidence récemment pour l'absorption atomique (Pinta, 1967 ; Skogerboe et coll., 1968). La calcination, en éliminant la présence d'acide sulfurique dans les solutions d'attaque, a permis un dosage du calcium dans de bonnes conditions. D'autre part, nous avons vérifié que l'acide chlorhydrique ajouté lors de la récupération des solutions d'attaque n'entraîne aucun effet dépressif sur la détermination du calcium, ce qui, à ces concentrations, est en accord avec les conclusions de Monder et Sells (1967).

*Magnésium*

Le dosage du magnésium par spectrophotométrie d'absorption atomique donne de bons résultats dans tous les cas étudiés.

*Sodium*

On observe pour le dosage du sodium de très importantes différences entre les deux types d'attaque. Nous avons décelé que les valeurs très élevées retrouvées après minéralisation par l'acide sulfurique étaient dues à d'importantes quantités de sodium relâchées par le verre des matras pendant cette opération : les matras utilisés cèdent en moyenne après chaque minéralisation 1,5 milligramme de sodium par litre aux solutions d'attaque, ce qui correspond approximativement aux quantités excédentaires retrouvées dans les minéralisations par voie humide. Cependant, la coïncidence ne peut être totale, car, en accord avec les résultats de Brownell (1965), l'acide sulfurique donne aussi un léger effet dépressif pour le dosage du sodium par spectrophotométrie d'absorption atomique. La calcination se faisant dans des creusets en silice et sans acide sulfurique, il est possible d'obtenir une estimation acceptable du sodium, compte tenu du fait que les échantillons végétaux analysés contiennent des quantités très faibles de cet élément (de l'ordre de quelques dizaines de p.p.m.).

Les dosages effectués sur les solutions d'attaque résultant de la calcination préconisée montrent l'intérêt de cette méthode notamment en ce qui concerne l'utilisation de techniques analytiques sensibles et rapides comme la spectrophotométrie d'absorption atomique.

*Azote*

L'utilisation de l'analyseur automatique Coleman donne d'excellents résultats comme l'indiquent l'intervalle de confiance et le coefficient de variation. D'ailleurs, des comparaisons avec la méthode classique Kjeldahl qui ont été effectuées dans un précédent travail (SIEURAC, 1964) avaient montré une nette supériorité de l'analyseur automatique.

## CONCLUSIONS

La calcination avec prédigestion du matériel végétal par deux millilitres d'acide nitrique est la plus efficace des minéralisations testées.

La méthode mise au point permet de doser, dans les végétaux, les principaux éléments : phosphore, potassium, calcium, magnésium, sodium et sans doute le fer à partir d'une seule prise d'essai d'environ 200 milligrammes de poudre végétale sèche.

En plus de sa rapidité et de sa précision, la technique proposée s'adapte particulièrement bien aux analyses en série.

*Reçu pour publication en mars 1970.*

## SUMMARY

MINERALIZATION OF PLANT TISSUES FOR THE QUANTITATIVE ANALYSIS OF P, Ca, Mg, Na, K

A comparison of different methods of mineralization has shown the advantage of calcination after pretreating the plant material with two millilitres of concentrated nitric acid. The method perfected makes it possible to estimate the phosphate content by coloimetric methods, and the potassium, calcium, magnesium and sodium by atomic absorption spectrophotometry from a single sample of about two hundred milligrams of dried powdered vegetable matter.

## ZUSAMMENFASSUNG

MINERALISIERUNG VON PFLANZENGEWEBEN MIT RÜCKSICHT AUF DIE ANALYSE VON P, K, Ca, Mg, Na

Der Vergleich der verschiedenen Mineralisierungs techniken hat den Vorteil des Kalzinierens nach einer Vorbehandlung des Pflanzenstoffes mit zwei Milliliter konzentrierter Salpetersäure gezeigt. Die entwickelte Methode gestattet eine Dosierung des Phosphors durch Kolorimetrie, des Kaliums, Kalziums, Magnesiums und des Natriums durch Atomabsorption-Spektrophotometrie mittels einer einzigen Probenentnahme von ungefähr 200 mg trockenes Pflanzenpulvers.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BRECH F., 1968. Comparison of optical emission and atomic absorption methods for analysis of plant tissues. *Ass. Analyt. chemist.*, **51** (1), 132-6.

BROWNELL P. L., 1965. Sodium as an essential micronutrient element for higher plant (*Atriplex vesicaria*). *Pl. Physiol.*, **40**, 460-68.

BRUNEL A., 1948. *Traité pratique de chimie végétale.* T. II, 391-450. G. Frère édit., Tourcoing.

CHARLOT G., 1961. *Les méthodes de la chimie analytique.* 572-7. Masson édit., Paris.

CHAT M.-G., 1966. Nouvelle méthode de minéralisation des végétaux pour les analyses chimiques. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **15**, 1087-93.

FIORAMONTI S., MARTY J.-R., BOSC M., 1964. *Quelques techniques analytiques.* 118 p., I. N. R. A. Stn. agron. Oenol. Toulouse.

JURION R., 1968. Application de quelques méthodes récentes au dosage des éléments majeurs dans les végétaux. *Chim. Anal.*, **50** (6), 325-33.

LACROIX J., MANSOUR, 1955. Dosage rapide de l'azote, du phosphore et du potassium dans une matière végétale. III. *Ann. Éc. nat. sup. agron. Toulouse.*

MAZOYER R., 1963. Possibilités de formation de pyrophosphates lors de la calcination des végétaux. Leurs conséquences sur le dosage de P. *Ann. agron.*, **14** (5), 873-80.

MONDER C., SELLS M., 1967. Influence of acids on the determination of calcium and magnesium by atomic absorption spectrophotometry. *Anal. Biochem.*, **30**, 215-23.

PERKIN-ELMER, 1964. *Analytical methods for atomic absorption spectrophotometry.* Perkin-Elmer Corporation, Norwalk, Connecticut.

PINTA M., 1967. *Principes généraux devant guider la mise au point d'une méthode par spectrophotométrie d'absorption atomique.* Stage sur deux méthodes physiques d'analyse : Absorption atomique, Activation. A. D. É. R. P., Orsay.

SIEURAC L., 1964. *Contribution à l'étude de la carence en bore sur la teneur en azote du sarrasin.* Diplôme d'études supérieures. Lab. Phys. vég. appl. E. N. S. A., Toulouse.

SKOGERBOE R. K., TODD R., MORRISON G. H., 1968. Absorption-emission intensity ratio measurements in flame spectrophotometry. *Anal. Chem.*, **40** (1), 2-5.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (2), 237.

INFORMATION

# COMMUNICATION IN SOIL SCIENCE AND PLANT ANALYSIS

Cette nouvelle revue éditée aux États-Unis (Marcel DEKKER, Inc., 95 Madison Avenue, New York, N. Y. 10 016-6 numéros par an) est destinée à la présentation rapide (reproduction directe de l'envoi des auteurs) de courtes notes relatives à la Science du Sol et à la Physiologie végétale, qui risqueraient de n'être pas publiées ailleurs en raison de leur concision. Les problèmes concernés sont : la chimie du sol, la minéralogie, la physiologie des plantes cultivées, l'analyse des sols et des végétaux, les techniques de fertilisation — sous tous les climats, y compris les climats tropicaux et subtropicaux.

Au sommaire du 1er numéro : Titration potentiométrique des chlorures dans les tissus végétaux. — Influence des variations d'humidité sur la concentration en sulfates dans un solonetz. — Influence de la décomposition des échantillons végétaux sur les résultats de l'analyse minérale — Assimilabilité et extractibilité de Mn du sol dans une expérience de chaulage. — Distribution de 15 éléments dans des feuilles de maïs. — Méthode rapide d'évaluation du niveau du zinc des sols. — Nutrition en Ca de la pomme de terre en relation avec la croissance et la teneur des feuilles en éléments minéraux. — Adsorption et désorption du phosphate dans les sols —

# RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

*Au début de chaque mémoire,* on indiquera : — *le titre du mémoire:* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs,* précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement,* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

*Les mémoires* seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* suffisamment précis (250 mots max.) pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé,* en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats,* à présenter de la manière la plus brève possible; e) *discussion et conclusion;* f) *résumé* en anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds les dons...; h) *références bibliographiques.*

*Les travaux originaux en anglais* doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

*Pour les autres documents* (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

*Les références bibliographiques* doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

*Pour les articles :* le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) : le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals,* ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

*Pour les ouvrages :* le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

*Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies,* doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée et porter les numéros des figures.

*Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils* seront envoyés *à l'état de projets,* leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 19 × 12,5 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

*Photographies :* Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12,4 photos 9 × 5,5,6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

*Correction des épreuves* : les auteurs recevront une épreuve à corriger.

*Envoi du manuscrit :* M. Henin, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

*Le Directeur de la publication:* M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 9-1970

*Dépôt légal: 3e trimestre 1970. N° d'impression: 915.*

# ANNALES
# AGRONOMIQUES

VOLUME 21 1970 NUMÉRO 3

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, PARIS-7e

*Ann agron.*, 1970, **21** (3), 247-268.

# ÉTUDE DES EFFETS RÉSIDUELS DES CULTURES FOURRAGÈRES SUR LES CULTURES ARABLES

## III. — Bilan de six années d'essais sur l'étude globale des effets résiduels et de leur durée [1]

P. JACQUARD [2] et L. CROISIER [3]

*Station d'Amélioration des Plantes fourragères, 86 - Lusignan*
*Institut national de la Recherche agronomique*

RÉSUMÉ

L'objet de ce travail est l'étude de l'influence de précédents prairiaux dans une rotation céréalière par comparaison des successions suivantes :

1. Maïs — blé (avec apport de fumier) ;
2. Maïs — blé (sans fumier, ni enfouissement des pailles) ;
3. Prairie (2 ans) — maïs — blé ;
4. Prairie (4 ans) — maïs — blé ;
5. Prairie (4 ans) — maïs — blé — maïs — blé — maïs — blé ;

La prairie de deux ans est un Ray-grass d'Italie + Trèfle violet, celle de quatre ans un Dactyle + Luzerne.

Le rendement des cultures est comparé entre les rotations 1, 2, 3 et 4, ce qui permet une première estimation de l'effet résiduel de prairies de nature et durée différentes. La nécessité d'introduire dans le dispositif toutes les séquences de chaque rotation au départ de l'expérimentation rend possible l'étude de l'influence de la durée sous prairie sur le rendement des céréales.

Les teneurs en éléments chimiques ont été déterminées :

1° pour le sol, au départ de l'expérimentation, en 1962, avant d'implanter les cultures, et au bout de six ans ;

2° pour les plantes, à partir de 1964 (N, $P_2O_5$, $K_2O$, Ca, Mg, Na).

Ces six premières années d'expérimentation sur l'étude globale des effets résiduels ont apporté des réponses partielles aux questions posées. Les résultats de rendement et les valeurs fournies par les analyses montrent que l'introduction d'une prairie est bénéfique. Cependant, des apports d'engrais (surtout azotés), couvrant les besoins des plantes, sont le moyen le plus efficace de maintenir les rendements. En conclusion, le bilan de systèmes culturaux avec et sans prairie est apprécié en termes d'éléments nutritifs, compte tenu des apports, des exportations et du recyclage ou de l'enfouissement des pailles.

(1) Les analyses de sol ont été réalisées par le Laboratoire d'Analyses des Sols du C.R.A.S.O., Bordeaux (M. Theiller), celles des récoltes par les Laboratoires de la Société Commerciale des Potasses d'Alsace, Mulhouse (M. Garaudeaux), dont le concours nous a été précieux.

(2) Adresse actuelle : C.E.P.E., B.P. 1018, 34-Montpellier.
(3) Adresse actuelle : C.N.R.A., 78-Versailles.

## I. — INTRODUCTION

L'objet de l'expérience présentée dans cet article est l'étude de l'influence de précédents « prairie » (constitués par l'association d'une graminée et d'une légumineuse) dans une rotation céréalière, grâce à l'obtention de données concernant les effets cumulatifs comparés de cultures fourragères de deux ou quatre ans et à l'évaluation de la persistance de l'action pour une prairie de quatre ans.

Les cinq successions confrontées sont :

| I<br>Avec matière organique (AMO) | II<br>Sans matière organique (SMO) | III (1) | IV (1) | V (1) |
|---|---|---|---|---|
| Maïs<br>Blé | M<br>B | $P_2$<br>$P_2$<br>M<br>B | $P_4$<br>$P_4$<br>$P_4$<br>$P_4$<br>M<br>B | $P_4$<br>$P_4$<br>$P_4$<br>$P_4$<br>M<br>B<br>M<br>B<br>M<br>B |
| Apport de fumier sur maïs et enfouissement de toutes les pailles. | Aucun retour de matière organique (pas de fumier, pailles exportées). | Deux ans de prairie | Quatre ans de prairie | Quatre ans de prairie |

(1) Pas d'apport de matière organique sur les céréales.

Bien que l'on puisse trouver une certaine justification agronomique aux traitements AMO et SMO, comme on le verra dans la conclusion, ils ont pour but principal ici de fournir des bornes extrêmes de variation, parcelles avec fumier plus résidus de récolte et parcelles sans retour de matière organique aérienne, entre lesquelles encadrer les parcelles ayant porté pendant deux ou quatre années des cultures fourragères non pâturées et ne recevant pas de fumier. Il est évident que le fumier, dans une certaine mesure, caractérise les exploitations avec animaux, alors que l'enfouissement de résidus est souvent lié à l'absence d'animaux. Cependant, dans le contexte actuel, il n'est pas aberrant de concevoir des exploitations qui récolteraient, déshydrateraient et vendraient une production de graminées fourragères.

Cet essai a débuté au printemps 1962. Les résultats analysés ici concernent uniquement les rotations I à IV, la dernière nécessitant encore quatre années de cultures annuelles pour terminer un cycle complet. Il est tout à fait possible d'établir

un bilan provisoire dans ce type d'essai sur les effets cumulatifs, car chaque rotation y constitue une unité indépendante et des comparaisons peuvent être réalisées avant l'obtention des résultats complets, c'est-à-dire avant que la rotation la plus longue ait accompli son cycle.

## II. — TRAITEMENTS ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Le dispositif est du type factoriel à 4 répétitions, chacune comportant les 24 phases de chaque rotation. Il y a donc, en tout, 96 parcelles.

Les caractéristiques d'implantation des cultures annuelles et des associations prairiales sont données au tableau 1. D'une manière générale, les *cultures arables*, blé et maïs, sont conduites comme dans les autres essais (JACQUARD et coll., 1969).

Au point de vue *fumure*, pour chaque culture et chaque année, l'apport de chacun des éléments N, $P_2O_5$ et $K_2O$, est de 100 unités/ha, *ce qui est relativement faible pour le premier et le dernier*, en regard des rendements élevés obtenus. La fertilisation en $P_2O_5$ et $K_2O$ est apportée en une seule fois au cours de l'hiver, alors que l'azote est fourni selon les modalités du tableau 2.

TABLEAU 1

*Caractéristiques d'implantation des cultures*

| Espèces | Variétés | Époque de semis | Densité | Écartement des lignes (cm) |
|---|---|---|---|---|
| Maïs – M – | *INRA* 260 | Fin avril | 75 000 pl/ha | 70 |
| Blé – B – | *Cappelle* | Novembre | 250 pl/m² | 19,2 |
| Ray-grass d'Italie – $P_2$ – Trèfle violet | *Rina* + *Flamand* | Courant mars | 750 pl/m² | 19,2 (lignes alternées) |
| Dactyle – $P_4$ – Luzerne | *Prairial* + *Flamande* | Courant mars | 750 pl/m² | 19,2 (lignes alternées) |

TABLEAU 2

*Modalités de fourniture de l'azote*

| Espèces | Répartition |
|---|---|
| Maïs | En une seule fois avant le semis. |
| Blé | En trois fractions égales (semis, tallage, montaison). |
| Prairies : | |
| Année d'implantation | En trois fractions égales (semis, après les premières et deuxièmes coupes). |
| Année d'exploitation $P_2$ | 33 unités en hiver puis après les trois premières coupes. |
| Année d'exploitation $P_4$ | 20 unités en hiver puis après les quatre coupes. |

*Dans la rotation 1, l'apport de matière organique comporte* :

1. sur maïs, 40 t/ha de fumier de stabulation libre de bovins, pendant l'hiver ;

2. après récolte de blé, l'enfouissement superficiel à la houe rotative des pailles fractionnées en brins de 8-10 cm, avec apport d'un supplément d'azote (40 unités) ;

3. après récolte de maïs, l'enfouissement des tiges, fractionnées par un labour à 20 cm.

*L'exploitation des fourrages* est pratiquée à des *stades* précis (après les deux ou trois coupes de l'année d'implantation) :

1° pour $P_2$, la première coupe est réalisée à l'épiaison de la graminée et les suivantes après 42 jours de repousse ;

2° pour $P_4$, la première coupe se situe lorsqu'il y a 50 fleurs de luzerne au $m^2$, et les suivantes à chaque début de floraison de la luzerne, au minimum après 49 jours de repousse.

Les traitements comparés dans cet article sont portés au tableau 3. Toutes les séquences de chaque rotation étant introduites au départ de l'expérimentation, la mesure des effets résiduels peut être réalisée directement en comparant les traitements 1, 3, 7 et 9, en termes de cultures arables. Mais certains autres résultats accessoires peuvent également être confrontés. Ce tableau permet, en outre, de se rendre compte de la structure de l'expérience.

## III. — RÉSULTATS

### 1. *Rendements des cultures*

a) *Comparaison des deux rotations avec et sans matière organique.*

La comparaison entre la rotation I (avec matière organique), traitements 1 et 2, et la rotation II (sans matière organique), traitements 3 et 4, porte sur 24 cultures (12 de maïs et 12 de blé) et est exprimée en moyenne annuelle ci-après (maïs et blé confondus) :

| Rotations | Rendement en M. S. | | Exportations d'azote (kg/ha) | Apports d'azote (kg/ha) | Bilan de l'azote (kg/ha) |
|---|---|---|---|---|---|
| | grain (q/ha) | total (t/ha) | | | |
| AMO | 49,85 | 10,663 | 130,9 | 243 (1) | + 112 |
| SMO | 45,90 | 9,615 | 107,5 | 100 | — 7,5 |
| Signification | NS | S | NS | | |

(1) Dont 100 unités de l'engrais.

Le bilan d'azote révèle un avantage très important pour la rotation I, conséquence de l'apport de fumier sur maïs et du retour des pailles au sol. Au bout de six ans, les rendements se différencient, mais beaucoup plus au niveau des pailles (rendement total-rendement en grain) qu'au niveau du grain (fig. 1) : mais c'est au niveau des exportations d'azote que la matière organique est le plus efficace (+ 15 p. 100 en moyenne pour les deux espèces).

TABLEAU 3

*Traitements comparés*

| Rotations | I | | II | | III | | | | IV | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Traitements | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Années | | | | | | | | | | | | | | |
| 1962 | M | B | M | B | $P_2$ | $P_2$ | M | B | $P_4$ | $P_4$ | $P_4$ | $P_4$ | M | B |
| 1963 | B | M | B | M | $P_2$ | M | B | $P_2$ | $P_4$ | $P_4$ | $P_4$ | M | B | $P_4$ |
| 1964 | M | B | M | B | M | B | $P_2$ | $P_2$ | $P_4$ | $P_4$ | M | B | $P_4$ | $P_4$ |
| 1965 | B | M | B | M | B | $P_2$ | $P_2$ | M | $P_4$ | M | B | $P_4$ | $P_4$ | $P_4$ |
| 1966 | M | B | M | B | $P_2$ | $P_2$ | M | B | M | B | $P_4$ | $P_4$ | $P_4$ | $P_4$ |
| 1967 | B | M | B | M | $P_2$ | M | B | $P_2$ | B | $P_4$ | $P_4$ | $P_4$ | $P_4$ | M |

Cependant l'analyse statistique du rendement en grain du blé conduit à la décomposition ci-dessous de la variation (cf. Annexe 1) :

| Origine de la variation | Somme des carrés | D. L. | Carré moyen | F calculé | Seuil de signification (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| Totale ..... | 2 149,40 | (N*tr*-1) = 47 | | | |
| Rotations (*t*) . | 85,87 | (*t*-1) = 1 | 85,87 | 5,57 | 5,0 |
| Répétitions (*r*) | 80,99 | (*r*-1) = 3 | 27,00 | 1,75 | 25,0 |
| Années (N) .. | 1 100,58 | (N-1) = 5 | 220,12 | 14,27 | 0,1 |
| *t* × N ..... | 172,36 | (*t*-1) (N-1) = 15 | 34,47 | 2,23 | 10,0 |
| *r* × N ..... | 431,76 | (*r*-1) (N-1) = 15 | 28,78 | 1,87 | 25,0 |
| Erreur totale | 277,84 | N (*t*-1) (*r*-1) = 18 | 15,43 | | |
| Erreur parcelle | 273,17 | C(*t*-1) (*r*-1) = 16 | 45,53 | | |
| Erreur parcelle × année .. | 4,67 | (N-C) (*t*-1) (*r*-1) = 12 | 0,39 | | |

On voit que la plus grande partie de l'erreur expérimentale est due au retour des cultures tous les deux ans sur les mêmes parcelles. L'essentiel des données peut se résumer ainsi :

Rendement en grain du blé (q/ha) :

| | AMO | SMO | $\overline{X}_A$ |
|---|---|---|---|
| 1962 | 46,7 | 46,6 | 46,6 |
| 1963 | 39,1 | 41,8 | 40,4 |
| 1964 | 34,3 | 34,4 | 34,3 |
| 1965 | 51,1 | 44,6 | 47,9 |
| 1966 | 43,0 | 35,7 | 39,3 |
| 1967 | 40,2 | 35,2 | 37,7 |
| $\overline{X}_R$ | 42,4 | 39,7 | 41,1 |

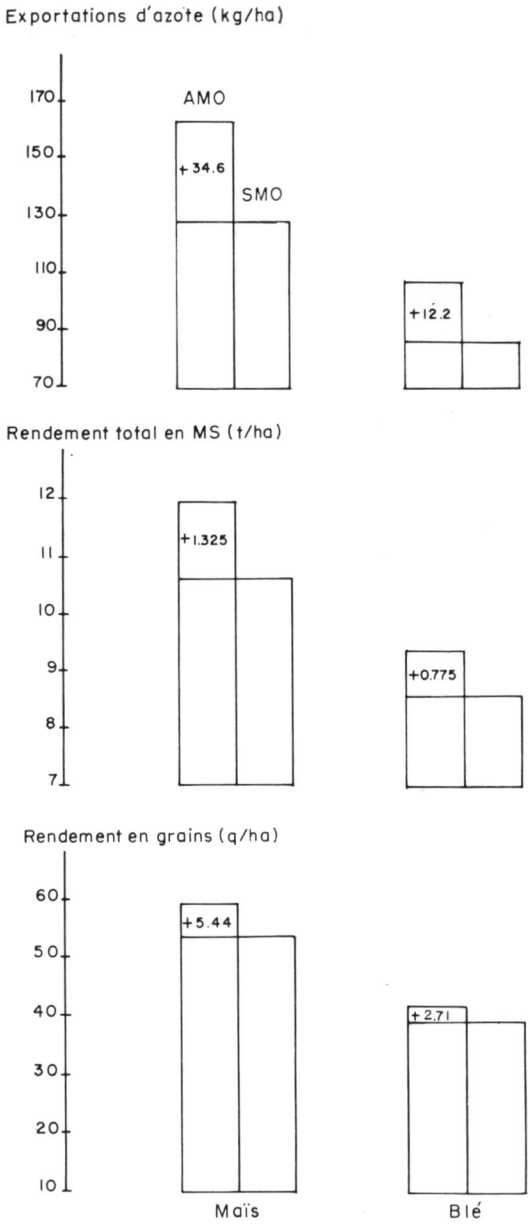



**Fig. 1.** — *Comparaison des rotations avec et sans matière organique* (6 ans, 24 cultures)

La cause principale de variation est l'effet « année » ; mais les deux rotations diffèrent, la différenciation se manifestant à partir de 1965 (fig. 2). En effet, la comparaison année par année des rendements du blé montre très clairement qu'un effet favorable de la matière organique n'apparaît que la quatrième année, ce qui a déjà été noté de nombreuses fois avec les enfouissements de paille. Si l'on

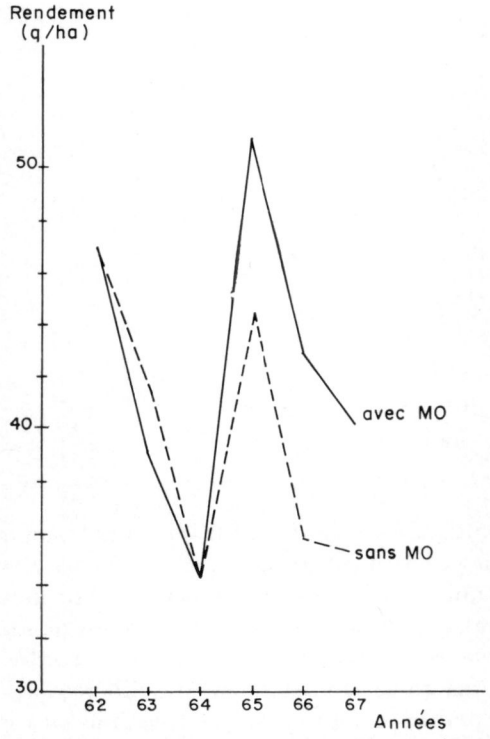



FIG. 2. — *Variation du rendement en grain du blé dans les deux rotations avec et sans matière organique*

ne s'intéresse qu'aux trois dernières années seulement, on trouve sur le blé des différences de + 6,5, + 7,3 et + 5,0 q/ha (qui, diluées par les années précédentes ne correspondent plus qu'à + 2,7 q/ha pour les moyennes). Il semble donc que ce soit un point important à faire ressortir qu'il faille quatre ans pour différencier les régimes d'entretien de la fertilité. Il est possible que le fumier de stabulation libre — auquel on peut attribuer une teneur en azote de 4 p. 1000 — soit relativement peu décomposé et qu'il ne libère pas beaucoup d'azote pour le blé avant que le système ne fonctionne par effets cumulatifs.

b) *Comparaison des quatre rotations.*

Cette comparaison permet une première estimation de l'effet résiduel de prairies de nature et durée différentes.

Les bilans en azote ne peuvent être calculés par suite de la composition bota-

nique des cultures fourragères (associations graminée-légumineuse), cependant les exportations ont pu être mesurées, pour la durée totale de la prairie :

— prairie de deux ans : 231 kg/ha de N pour une production de 14,15 t/ha de MS;

— prairie de quatre ans : 752 kg/ha de N pour une production de 38,79 t/ha de MS.

Les effets résiduels, évalués en 1966 à l'aide de la culture de maïs-grain et à l'aide du blé en 1967, sont donnés au tableau 4.

TABLEAU 4

| Rotation | Rendement total en M. S. (t/ha) (1) | | | Rendement en grain (q/ha, M. S.) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Maïs 1966 | Blé 1967 | Somme des deux cultures | Maïs | Blé |
| AMO trait. 1 ..... | 14,149 | 9,034 | 23,183 | 69,03 | 40,17 |
| $P_4$ trait. 9 ..... | 11,725 | 9,643 | 21,368 | 59,83 | 43,16 |
| $P_2$ trait. 7 ..... | 11,232 | 9,077 | 20,309 | 53,23 | 37,97 |
| SMO trait. 3 ..... | 10,978 | 8,016 | 18,994 | 55,89 | 34,23 |
| P.p.d.s. ..... | 2,060 | 1,053 | 1,973 | | |

(1) Grain + paille (+ rafles).

En 1966, les conditions estivales furent très favorables au maïs, vis-à-vis duquel la rotation I se révèle être le meilleur précédent, comparée aux prairies.

En 1967, le blé qui succède au maïs permet d'établir un classement différent, bien que non significatif, sauf bien entendu pour la rotation sans matière organique qui reste la plus faible. En sommant les deux récoltes, l'ordre reste toujours favorable à la rotation I, malgré le comportement très différent des deux cultures après les deux précédents prairiaux. La rotation II constitue un cas extrême. Les effets « précédents » les plus importants apparaissent donc sur maïs, dans les conditions

TABLEAU 5

*Variation des résultats obtenus derrière une prairie de 2 ans*
(Rendements en M. S., t/ha)

| Traitements | Années | | | | Séquence (M, B) |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1964 | 1965 | 1966 | 1967 | |
| 5 M ..... | 6,106 | | | | 15,140 |
| 5 B ..... | | 9,034 | | | |
| 8 M ..... | | 12,083 | | | 21,192 |
| 8 B ..... | | | 9,109 | | |
| 7 M ..... | | | 11,232 | | 20,309 |
| 7 B ..... | | | | 9,077 | |
| P.p.d.s. ..... | | | | | 3,011 |

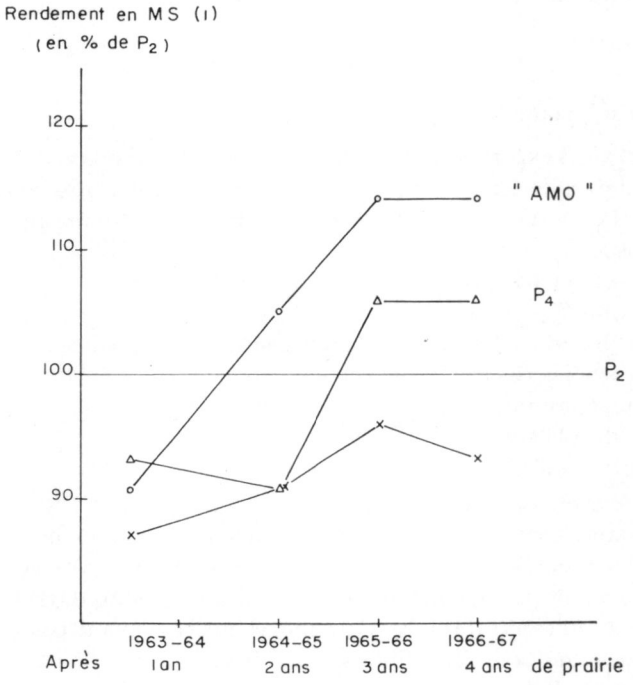
expérimentales (pas de sécheresse estivale, donc possibilité pour cette plante d'exprimer son potentiel). Le blé, très sensible à la carence en azote et, par conséquent, à la minéralisation, manifeste nettement un retard dans son alimentation : seule la paille paraît profiter de la matière organique prairiale, 5,3 t/ha derrière les deux précédents « prairie » contre 5,0 en AMO et 4,6 en SMO ; il semble même que l'effet soit plus net après ray-grass d'Italie-trèfle violet qu'après luzerne-dactyle.

Le comportement du blé, céréale d'hiver, est très indépendant de l'année, mais celui du maïs est fortement influencé par le déficit pluvio-estival (tabl. 5).

Les rotations avec prairie extériorisent peu d'effets ; mais il est possible qu'une séquence arable de deux ans ne suffise pas à les mettre en évidence par suite de la lenteur de minéralisation de la matière organique.

c) *Influence de la durée sous prairie sur le rendement des céréales*

La nécessité d'introduire dans le dispositif toutes les séquences de chaque rotation au départ de l'expérimentation, dans le but de maîtriser les effets « année », permet d'étudier l'évolution des rendements en fonction de la durée sous prairie (fig. 3).




(1) Somme des deux cultures

FIG. 3. — *Évolution des rendements en M. S. des séquences* (M, B) *en fonction de la durée sous prairie*
(× ——— × « SMO »)

Les deux rotations à base de céréales n'étant pas encore stabilisées et ne pouvant servir de témoin de référence, les résultats sont exprimés en pourcentage des rendements de la séquence (maïs, blé) derrière prairie de deux ans. Si l'on fait abs-

traction des deux premiers résultats, il apparaît une différenciation après trois années de présence de la prairie de luzerne-dactyle.

Les rotations sont donc maintenant nettement hiérarchisées et l'évolution ultérieure des successions avec et sans matière organique devrait ouvrir encore l'éventail des différences constatables.

Mais, à nouveau, en 1967, le déficit hydrique au cours de l'été a réduit très nettement les écarts entre les deux systèmes, exprimés en rendement de maïs :

| | Rendement total en M. S. (t/ha) | Rendement en grain (q/ha) |
|---|---|---|
| SMO | 9,150 | 41,4 |
| AMO | 10,530 | 43,1 |
| Signification | S | NS |

alors que ceux du blé sont très différents (tabl. 4).

### 2. *Teneurs en éléments chimiques*

a) *Teneurs du sol* (point 0, point 6 ans).

Au départ de l'expérimentation en 1962, avant d'implanter les cultures, un prélèvement moyen de terre, par parcelle élémentaire, fut réalisé afin de constituer un « point 0 ». De nouveaux prélèvements, effectués en automne 1967, représentent le « point 6 ans ».

Les analyses ont porté sur :

l'azote (Kjeldahl),
le calcium, le sodium et le potassium échangeables,
le carbone (méthode de Anne),
le magnésium (méthode de Schachtschabel),
l'acide phosphorique (méthode de Dyer),
le pH (eau).

Le rapport C/N a été calculé.

On a pu ainsi comparer l'évolution des teneurs pour les quatre traitements étudiés précédemment (1, 3, 7, 9), auxquels on a ajouté le traitement 13, estimant qu'il était intéressant de connaître le bilan après 4 années de dactyle-luzerne (symbole $P'_4$ dans les tableaux) (tabl. 6). Certaines données n'ayant pas fait l'objet d'un traitement statistique sont rassemblées au tableau 7.

On peut tout d'abord remarquer une baisse quasi constante de la majeure partie des teneurs dans la rotation sans matière organique et une augmentation avec matière organique. Ceci est conforme aux résultats obtenus avec les performances végétales. A nouveau, la rotation 1 révèle un niveau de fertilité supérieur, même vis-à-vis de la présence d'une prairie de 4 ans, pour la teneur en azote. Cependant, cette prairie, lorsqu'on mesure son effet direct, à l'aide du traitement 13, laisse apparaître un très léger enrichissement en azote et en carbone.

Par contre, derrière prairie de luzerne-dactyle, le déficit en potassium est élevé

TABLEAU 6

*Évolution des teneurs du sol en éléments minéraux*

| Traitements | | Azote Pt 0 | Azote Pt 6 | Azote Différence | Azote Signification | Calcium Pt 0 | Calcium Pt 6 | Calcium Différence | Calcium Signification |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SMO | 3 | 1,502 | 1,380 | — 0,122 | S | 1,480 | 1,319 | — 0,161 | S |
| AMO | 1 | 1,492 | 1,675 | + 0,183 | S | 1,439 | 1,421 | — 0,018 | Non calculé |
| $P_4$ | 9 | 1,533 | 1,552 | + 0,019 | Non calculé | 1,492 | 1,427 | — 0,065 | NS |
| $P_2$ | 7 | 1,497 | 1,425 | — 0,072 | NS | 1,398 | 1,269 | — 0,129 | S |
| $P'_4$ | 13 | 1,460 | 1,522 | + 0,062 | NS | 1,368 | 1,351 | — 0,017 | Non calculé |
| $\overline{X}$ | | 1,496 NS | | | | 1,435 NS | | | |
| | | Potasse | | | | Acide phosphorique | | | |
| SMO | 3 | 0,275 | 0,165 | — 0,110 | S | 0,330 | 0,336 | + 0,006 | Non calculé |
| AMO | 1 | 0,272 | 0,424 | + 0,152 | S | 0,300 | 0,400 | + 0,100 | S |
| $P_4$ | 9 | 0,252 | 0,093 | — 0,159 | S | 0,348 | 0,336 | — 0,012 | NS |
| $P_2$ | 7 | 0,231 | 0,176 | — 0,055 | S | 0,276 | 0,339 | + 0,063 | NS |
| $P'_4$ | 13 | 0,275 | 0,117 | — 0,158 | S | 0,300 | 0,305 | + 0,005 | Non calculé |
| $\overline{X}$ | | 0,261 NS | | | | 0,310 P.p.d.s. = 0,043 | | | |
| | | Carbone | | | | Magnésium | | | |
| SMO | 3 | 14,12 | 13,00 | — 1,12 | S | 0,0615 | 0,0481 | — 0,0134 | S |
| AMO | 1 | 14,15 | 16,81 | + 2,26 | S | 0,0640 | 0,0831 | + 0,0188 | S |
| $P_4$ | 9 | 14,12 | 14,50 | + 0,38 | Non calculé | 0,0645 | 0,0490 | — 0,0155 | S |
| $P_2$ | 7 | 13,55 | 13,40 | — 0,15 | NS | 0,0640 | 0,0575 | — 0,0065 | NS |
| $P'_4$ | 13 | 13,52 | 14,22 | + 0,70 | NS | 0,0652 | 0,0421 | — 0,0231 | S |
| $\overline{X}$ | | 13,96 NS | | | | 0,0638 NS | | | |

TABLEAU 7

*Évolution de certaines caractéristiques du sol*

| Traitements | Sodium | | | pH (eau) | | | C/N | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Point 0 | Point 6 | Différence | Point 0 | Point 6 | Différence | Point 0 | Point 6 | Différence |
| SMO 3 | 0,016 | 0,010 | — 0,006 | 6,52 | 6,21 | — 0,30 | 9,3 | 9,3 | 0 |
| AMO 1 | 0,019 | 0,011 | — 0,008 | 6,60 | 6,40 | — 0,20 | 9,7 | 9,9 | + 0,2 |
| $P_4$ 9 | 0,016 | 0,012 | — 0,004 | 6,60 | 6,24 | — 0,36 | 9,2 | 9,4 | + 0,2 |
| $P_2$ 7 | 0,010 | 0,010 | 0 | 6,51 | 6,20 | — 0,31 | 9,2 | 9,4 | + 0,2 |
| $P'_4$ 13 | 0,017 | 0,014 | — 0,003 | 6,53 | 6,02 | — 0,51 | 9,2 | 9,3 | + 0,1 |
| $\bar{X}$ | 0,015 | | | 6,55 | | | 9,3 | | |

(les restitutions étant insuffisantes : 100 kg de $K_2O$/an). Un déficit en magnésium apparaît aussi. Ces faits devraient inciter à parfaire l'étude de fumures en ces éléments, ajustées aux niveaux d'exportations des prairies. Des effets défavorables sur cultures arables pourraient dans certains cas provenir de déséquilibres alimentaires accumulés.

b) *Teneurs des plantes.*

A partir de 1964, l'étude des teneurs des plantes, en les mêmes éléments que précédemment, a été entreprise. Elle permet de réaliser, sous une autre forme, les comparaisons effectuées au niveau des rendements. La première porte sur les teneurs moyennes dans les deux rotations avec et sans matière organique (tabl. 8).

D'une manière générale, les teneurs en chaque élément, dans la matière sèche, sont plus élevées lorsque le milieu est plus riche, cela est très net pour l'azote et le potassium, surtout pour la paille. Les plus fortes teneurs accompagnent les plus forts rendements. Cependant, pour le potassium, le calcium et le magnésium, on constate des antagonismes se manifestant sous forme de substitutions ioniques (potassium dans le grain de blé).

TABLEAU 8

*Comparaison des teneurs moyennes* (%) *dans les rotations avec et sans matière organique*

Blé : moyenne des trois cultures 1964, 1965, 1966.
Maïs : moyenne des deux cultures 1965 et 1966.

| Éléments | Grain | | | | Paille | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Blé | | Maïs | | Blé | | Maïs | |
| | SMO | AMO | SMO | AMO | SMO | AMO | SMO | AMO |
| N | 1,780 | 1,880 | 1,670 | 1,850 | 0,300 | 0,340 | 0,890 | 1,090 |
| $P_2O_5$ | 0,386 | 0,390 | 0,365 | 0,375 | 0,050 | 0,076 | 0,180 | 0,250 |
| $K_2O$ | *0,483* | *0,460* | 0,445 | 0,455 | 0,880 | 1,170 | 1,435 | 1,680 |
| Ca | 0,050 | 0,047 | 0,025 | 0,025 | 0,213 | 0,213 | *0,555* | *0,300* |
| Mg | 0,123 | 0,133 | 0,135 | 0,135 | 0,076 | 0,083 | *0,110* | *0,095* |
| Na | 0,013 | 0,013 | 0,010 | 0,010 | 0,017 | 0,020 | 0,025 | 0,020 |

Une deuxième comparaison porte sur les teneurs du maïs et du blé dans les quatre successions (tabl. 9). Sur le maïs, première culture, le précédent prairie n'entraîne pour aucun des éléments de teneurs supérieures à celles de la rotation avec matière organique (AMO) ; dans la paille, on constate un certain antagonisme entre K, Ca et Mg. Après retournement de la prairie de 4 ans, la teneur en potassium de la paille de maïs révèle un milieu appauvri, ce qui est à rapprocher de la teneur du sol en cet élément. Par compensation, il y a une meilleure assimilation du calcium et du magnésium.

La deuxième culture, bien que fort différente à de nombreux points de vue, réagit de façon analogue. A nouveau, l'attention doit être portée sur la teneur en potasse des pailles. Dans le contexte expérimental défini ici, on constate, au bout de six ans, que les exportations à partir du sol n'ont pas été compensées. Dans le

cadre d'une agriculture avec élevage, le déficit serait en partie comblé par l'intermédiaire des fumiers ; par contre, dans une exploitation sans animaux, dont tous les fourrages seraient vendus déshydratés, il existe un risque dont la couverture minimum est constituée par une compensation des exportations.

TABLEAU 9

*Comparaison des teneurs du maïs* (récolte 1966) *et du blé qui lui a succédé* (récolte 1967) *dans les quatre rotations*

| Éléments | | Grain | | | | Paille | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | SMO | AMO | $P_2$ | $P_4$ | SMO | AMO | $P_2$ | $P_4$ |
| Maïs 1966 | N ..... | 1,54 | 1,81 | 1,65 | 1,63 | 0,70 | 0,86 | 0,77 | 0,90 |
| | $P_2O_5$ .. | 0,34 | 0,36 | 0,29 | 0,33 | 0,15 | 0,24 | 0,12 | 0,16 |
| | $K_2O$ ... | 0,45 | 0,46 | 0,41 | 0,44 | 1,44 | **1,86** | 1,54 | **1,30** |
| | Ca .... | 0,04 | 0,04 | 0,06 | 0,02 | 0,44 | *0,24* | 0,38 | *0,49* |
| | Mg ... | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,11 | *0,10* | 0,12 | *0,15* |
| | Na .... | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Blé 1967 | N ..... | 1,65 | 1,82 | 1,66 | 1,71 | 0,23 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| | $P_2O_5$ .. | 0,35 | 0,38 | 0,37 | 0,37 | 0,07 | 0,09 | 0,07 | 0,05 |
| | $K_2O$ .. | 0,46 | 0,46 | 0,47 | 0,47 | 1,05 | **1,41** | 1,01 | **1,01** |
| | Ca .... | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | *0,14* | 0,16 | *0,18* |
| | Mg ... | 0,11 | 0,10 | 0,11 | 0,11 | 0,04 | *0,04* | 0,05 | *0,05* |
| | Na .... | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |

## IV. — CONCLUSIONS

Ces six premières années d'expérimentation sur l'étude globale des effets résiduels ne peuvent apporter que des réponses partielles aux questions posées, en attendant le bilan définitif, possible lorsque les dix années de la succession V seront révolues. Dans ce premier temps, la comparaison porte surtout sur les rotations avec matière organique et prairie. La valeur précédent d'une prairie de quatre ans peut notamment être estimée.

Les résultats de rendement et les valeurs fournies par les analyses chimiques sont suffisamment significatifs pour permettre d'avancer que, dans les bonnes terres de limon du type « argile rouge à châtaigniers », l'introduction d'une prairie de longue durée (à base de luzerne et de graminée) peut, dans certaines conditions, entraîner un effet bénéfique, cette amélioration de fertilité étant plus probablement physique que chimique, au vu des résultats d'analyse (plante et sol). Quant à la représentativité d'une situation réelle par la rotation avec matière organique, on peut simplement la rapprocher d'un système où les fourrages n'étant pas inclus dans la succession des cultures, le fumier produit par les animaux est entièrement transféré aux sols arables.

Des apports d'engrais (surtout azotés), couvrant les besoins des plantes, sont

actuellement le moyen le plus efficace pour maintenir des rendements élevés, les tendances techniques actuelles ne permettant pas une utilisation optimale du potentiel nutritif de la matière organique, la limitation principale à cette utilisation étant le déphasage entre la fourniture, par le sol, d'éléments chimiques et les besoins des plantes. De plus, si l'on compare les bilans pour les éléments de base de la rotation avec matière organique et de celle comportant une prairie restant en place quatre ans, il semble qu'en définitive il soit très favorable aux cultures annuelles. Dans le cas de l'enfouissement des pailles, on retourne au sol les quantités suivantes :

| Cultures | | Éléments | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | N | $P_2O_5$ | $K_2O$ | Ca | Mg | Na |
| Maïs | % des exportations contenu dans la paille | 29,4 | 28,7 | 67,9 | 91,4 | 38,4 | 50,6 |
| | restitution au sol (kg/ha) | 42,5 | 9,0 | 72,6 | 22,4 | 5,4 | 0,96 |
| Blé | % | 17,0 | 15,0 | 66,5 | 84,2 | 39,1 | 55,8 |
| | restitution | 15,7 | 2,8 | 43,5 | 9,9 | 3,5 | 0,77 |

Ce tableau a été établi à l'aide des teneurs moyennes par cultures (maïs 1965 et 1966, blé 1964 à 1966), sur la base d'un rendement total en M.S. du maïs de 12, 011 t (dont 39,8 p. 100 de paille) et d'un rendement du blé de 8,762 t (dont 52,3 p. 100 paille). Ils correspondent à des valeurs d'exportations légèrement inférieures à celles indiquées par BARBIER (1961).

Le bilan complet devrait tenir compte du fumier enfoui et des résidus sous prairie. D'autre part, la situation serait modifiée si le maïs était ensilé et le blé récolté immature. Les restitutions varient donc selon la nature des éléments et de la culture. Ce retour au sol sous la forme d'une matière organique peu lignifiée, à décomposition rapide, entraîne un recyclage accéléré des éléments et leur meilleure accessibilité pourrait, dans une certaine mesure, expliquer les rendements supérieurs obtenus.

Dans le cas de la prairie, il n'y a pas de retour des appareils aériens, mais seulement apports d'engrais. On peut, dans ces conditions, comparer les exportations totales en éléments d'une prairie de dactyle-luzerne durant quatre ans à celles de quatre cultures annuelles successives (2 maïs et 2 blé), ordonnées comme dans la rotation avec matière organique (tabl. 10).

En ce qui concerne l'azote, l'apport par la luzerne peut être estimé à 100 kg/ha (JACQUARD et coll., 1969), compte tenu d'une durée de quatre ans de la culture et de la présence d'une graminée. L'un des aspects les plus frappants a trait au bilan de potasse. On exporte près de trois fois plus de cet élément en quatre ans de prairie qu'en quatre cultures arables. Ce chiffre d'exportation est à rapprocher des quatre fois cent unités apportées par an : dans les conditions de l'expérience, le bilan déficitaire en potasse derrière dactyle-luzerne se chiffre à 537 kg.

Si l'on ne tient pas compte du recyclage par le sol des éléments contenus dans les fèces, on constate que pour aboutir à des exportations totales en matière sèche plus faibles qu'avec les céréales, les quantités d'éléments nutritifs nécessaires sont plus élevées avec la prairie. Il reste en faveur de cette dernière, la qualité particulière de la matière organique accumulée.

TABLEAU 10

*Exportations totales sur 4 ans* (kg/ha)

| Cultures | Production de M. S. (t/ha) | N | $P_2O_5$ | $K_2O$ | Ca | Mg | Na |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M + B + M + B | 41,546 (2) | 474,4 | 100,2 | 344,8 | 72,6 | 46,6 | 6,6 |
| Prairie (1) | 36,731 | 685,2 | 109,2 | 936,7 | 283,6 | 70,1 | 43,0 |

(1) Valeurs moyennes sur plusieurs prairies.
(2) Dont 20,416 de grain.

On peut, à ce point, élargir les conclusions en se basant à la fois sur le raisonnement et sur les données du mémoire, pour corriger ce que peut avoir eu d'artificiel le système de fumure et de restitution employé dans le dispositif.

Si donc on effectue le bilan des éléments nutritifs, compte tenu des apports d'engrais et de fumier, de l'enfouissement des pailles et du recyclage des éléments nutritifs par les bouses et les urines (d'après des pourcentages déterminés par HUTTON), on aboutit aux balances du tableau 11 (en kg/ha), l'efficacité relative des différentes formes d'azote organique et inorganique étant supposée de même ordre.

On n'a pas mis les pailles — ou le recyclage — au même niveau que les apports, bien qu'on les ait déduits des exportations. Cela ne change pas le résultat du bilan et peut paraître byzantin mais on ne peut recycler ou enfouir quelque chose qui n'a pas été, au préalable, prélevé et il apparaîtrait anormal de recycler 862 kg de $K_2O$ en apportant 400 kg sous forme d'engrais. Cela suppose une participation, ou une avance importante du sol qui ne pourrait être le fait de n'importe quel terrain. Il en est de même d'ailleurs pour l'azote.

Ceci étant, la comparaison entre cultures devient alors tout à fait différente :

1° les prairies ne sont plus des cultures épuisantes du point de vue chimique, sauf bien entendu si tout ou grande partie est utilisé ailleurs que sur l'exploitation (déshydratation en vue de la commercialisation du produit) ;

2° les cultures arables, sur le seul plan chimique, peuvent fort bien se passer de fumier ; sauf peut-être pour le magnésium. C'est ainsi que dans le sud-est de l'Angleterre une augmentation des incidences de symptômes de carence en Mg, signalée récemment, a pu être attribuée aux plus faibles quantités de fumier de ferme apportées aux cultures, que précédemment (BOLTON et PENNY, 1968).

Il paraît curieux d'observer autant de manque à gagner dans le bilan passant par le fumier, car, deux fois 40 t de fumier en 4 ans, constitue un apport copieux que l'on doit comparer avec la production de la « prairie ». En effet, si l'on estime qu'une unité de gros bétail (U. G. B.) produit 10 t de fumier par an et nécessite 2,5 t de

## TABLEAU II

*Balance des éléments nutritifs*

| | Cultures arables | | | | | | Prairies | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | N | $P_2O_5$ | $K_2O$ | Na | Mg | | N | $P_2O_5$ | $K_2O$ | Na | Mg |
| *Apports* | | | | | | *Apports* | | | | | |
| Engrais | + 400 | + 400 | + 400 | | | Engrais | + 400 | + 400 | + 400 | | |
| Fumier | + 320 | + 160 | + 320 | | | Luzerne | + 100 | | | | |
| | + 720 | + 560 | + 720 | | | | + 500 | + 400 | + 400 | | |
| *Exportations* | — 474 | — 100 | — 345 | — 7 | — 47 | *Exportations* | — 685 | — 109 | — 937 | — 43 | — 70 |
| dont, restituées par les pailles | + 116 | + 24 | + 232 | + 3 | + 18 | dont, pouvant entrer en recyclage* | + 541 | + 72 | + 862 | + 34 | + 60 |
| Balance | + 362 | + 484 | + 607 | — 4 | — 29 | | + 356 | + 363 | + 325 | — 9 | — 10 |

* Recyclage, sur place en pâture ou sur une autre partie de l'exploitation pour des prairies fauchées.

Remarque : La différence en faveur des cultures arables, correspond au « recyclage » du fumier. Si on retire cet apport, on trouve, pour N : — 74, pour $P_2O_5$ : + 300, pour $K_2O$ : + 55 ; il en ressort un besoin plus élevé en potasse dans le cas des prairies.

paille, 40 t de fumier tous les deux ans correspondent à la production de fumier de 2 U. G. B. par an et à 5 t de paille (soit deux fois 0,5 ha de blé, au niveau de production de l'essai considéré). Or, la prairie exporte $\frac{685}{4} = 171$ kg d'azote et 8 t de M. S., c'est-à-dire la nourriture de 2 à 2,5 U. G. B. par an, ce qui est à peu près équivalent au nombre précédent. Cependant, dans un cas, on trouve dans le fumier *320* contre *541* recyclés à partir de la prairie. Il semblerait donc que les estimations faites pour le fumier soient trop faibles ; mais elles proviennent de moyennes d'analyse. On est donc amené à penser que le pourcentage de recyclage de l'azote est trop élevé.

On peut aussi comparer ces calculs avec les résultats du tableau 6, sachant que, dans l'expérience, le recyclage n'a pas eu lieu derrière prairie.

On s'aperçoit, par exemple, que pour cinq éléments, les relations d'ordre obtenues dans les rotations AMO et $P_4$ sont identiques, qu'elles soient établies d'après le bilan calculé (B) ou le bilan du sol (S) :

| Rotations | N | | $P_2O_5$ | | $K_2O$ | | Mg | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | B | S | B | S | B | S | B | S |
| AMO | + 362 | + 0,183 | + 484 | + 0,100 | + 607 | + 0,152 | — 29 | + 0,019 |
| $P_4$ | — 185 | + 0,019 | + 291 | — 0,012 | — 537 | — 0,159 | — 70 | — 0,016 |

En définitive, dans les conditions d'expérimentation (localisation écologique notamment) le seul critère de choix entre cultures arables et inclusions de prairies utilisées sur place, dans la rotation, sera d'ordre économique (revenu brut en produits commercialisés). Les aspects agronomiques joueront très peu dans l'orientation prise par l'agriculteur.

*Reçu pour publication en Avril 1970.*

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier G. LEFEVRE, Directeur de la Station d'Agronomie d'Amiens, pour ses observations constructives en cours de rédaction de cet article.

## SUMMARY

A STUDY OF THE RESIDUAL EFFECTS OF FODDER CROPS ON SUBSEQUENT ARABLE CROPS.

III. — RESULTS ON SIX YEARS OF TRIALS IN A COMPREHENSIVE STUDY OF THE RESIDUAL EFFECTS AND OF THEIR DURATION

The object of this research was to study the influence of preceding grassland in a cereal rotation by comparison with the following treatments :

I. Maize and Wheat (manure added),
II. Maize and wheat (without manure, no ploughing in of straw),

III. Ley (2 years) + maize and wheat,
IV. Ley (4 years) + maize and wheat,
V. Ley (4 years) + maize and wheat + maize and wheat + maize and wheat.

The 2 years ley was a mixture of Italian ryegrass and red clover, that of the 4 years ley a mixture of Cocksfoot and Lucerne.

The yields of the treatments were compared as between rotations 1, 2, 3 and 4 which allowed a preliminary estimate of the residual effect exercised by grassland of different composition and of variable duration. The need to introduce in the layout all the sequences of each rotation from the beginning of the experiment made it possible to study the influence of the duration of the ley on the yield of cereals.

The chemical composition was determined in respect of the following :

1. soil : at the commencement of the experiment in 1962, before its laying down, and after six years ;

2. plants : since 1964 (N, $P_2O_5$, $K_2O$, Ca, Mg, Na).

These first six years of experiment in the comprehensive study of residual effects have resulted in partial answers to the questions asked. The yield results and the values furnished by analysis indicate that the introduction of a ley is beneficial. However applications of manure (especially nitrogenous) sufficient for the requirements of the plants are the most efficient means of maintaining yields. In conclusion, the effect of cultural systems with and without grassland is evaluated in terms of nutritive elements, taking into account the application of manure and of the removal and of the recycling or of the ploughing in of the straw.

## ZUSAMMENFASSUNG

### UNTERSUCHUNG DER NACHWIRKUNGEN VON FUTTERKULTUREN AUF GETREIDEKULTUREN

### III. — SECHS-JAHRE BILANZ VON VERSUCHEN ZUR GESAMTUNTERSUCHUNG DER NACHWIRKUNGEN UND DEREN DAUER

Es handelt sich in dieser Arbeit um das Studium der Einwirkung von Wiesenkulturen in einer Getreidefruchtfolge, wobei die nachstehenden Folgen verglichen werden :

1. Mais + Weizen (mit Mistzufuhr) ;
2. Mais + Weizen (ohne Mist und ohne Unterpflügen des Strohes) ;
3. Wiese (2 jährig) + Mais + Weisen ;
4. Wiese (4 jährig) + Mais + Weizen ;
5. Wiese (4 jährig) + Mais + Weisen + Mais + Weizen + Mais + Weizen.

Die zwei jährige Wiese besteht aus italienischem Raygras + Rotklee, die vierjährige Wiese aus Knaulgras + Luzerne.

Der Ertrag der Kulturen wird für die Fruchtfolgen 1, 2, 3 und 4 verglichen, was eine erste Schätzung der Nachwirkung von Wiesen verschiedener Beschaffenheit und Alters erlaubs. Die Notwendigkeit die gesamten Sequenzen jeder Fruchtfolge am Anfang der Versuche einzuführen, ermöglicht die Untersuchung der Einwirkung des Alters der Wiese auf den Ertrag der Getreidekultur.

Der Ertrag an chemischen Elementen wurde bestimmt :

1° für den Boden, am Anfang der Versuche, im Jahre 1962 vor der Einpflanzung und nach einem Verlauf von sechs Jahren ;

2° für die Pflanzen, von 1964 ab (N, $P_2O_5$, $K_2O$, Ca, Mg, Na).

Mit den Ergebnissen der sechs ersten Versuchsjahre zur Gesamtuntersuchung der Nachwirkungen werden die gestellten Fragen teilweise beantwortet. Die Ertragsergebnisse und die durch die Analysen ermittelten Werte zeigen, dass die Einführung einer Wiese günstig ist. Düngerzufuhren (besonders stickstoffhaltige), die die Bedürfnisse der Pflanzen decken, sind hingegen das wirksamste Mittel, die Erträge zu gewährleisten.

Als Schlussfolgerung wird festgestellt, dass die Bilanz der Kultursysteme, mit oder ohne Wiese, in Form von Nährstoffelementen, mit Rücksicht auf die Zufuhren, die Abgänge und die Rückführung oder auf das Eingraben von Stroh, auszudrücken ist.

## РЕЗЮМЕ

*Изучение остаточных эффектов кормовых культур на пахотные. III Шестилетний баланс опытов по общему изучению остаточных эффектов и их длительности.*

П. Жаккар, Л. Круазье.

Изучалось влияние луговых предшественников в злаковом севообороте, при помощи сравнения следующих последовательностей :

1. — кукуруза — пшеница (со внесением навоза).
2. — кукуруза — пшеница (без внесения навоза, без запашки соломы.)
3. — луг (2 года) — кукуруза — пшеница.
4. — луг (4 года) — кукуруза — пшеница.
5. — луг (4 года) — кукуруза — пшеница — кукуруза — пшеница — куккуруза — пшеница.

Двухлетние луга представляли смесь италянского рай-грасса и красного клевера. Четырехлетние луга — смесь ежи и люцерны.

Урожайность культур сравнивалась в первых четырех вариантах севооборота для первичной оценки остаточного действия лугов разного состава и различной длительности. Необходимость введения всех последовательностей в порядок каждого севооборота в начале опыта, позволила изучить влияние продолжительности луговой культуры на урожайность злаков.

Проводились также анализы содержания различных химических элементов :

а) в почве, в начале опыта в 1962-м году, и по истечении 6-ти лет;

б) в растениях, начиная с 1964-го года (N, $P_2O_5$, $K_2O$, Ca, Mg, Na).

Первые шесть лет изучения остаточных эффектов луговых культур дали частичный ответ на поставленные вопросы. Урожайность и результаты анализов показывают, что введение лугов в севооборот оказывает благоприятное действие на последующие культуры. Но внесение удобрений (в особенности додкормки азотом), покрывающее нужды растений, является самым эффективным способом поддержания урожайности. В заключение можно сказать, что баланс различных систем культуры, со включением лугов в севооборот, или без них, необходимо оценивать с точки зрения питательных элементов, принимая во внимание подкормки, экспорт и возвращение питательных элементов в почву пасущимся скотом, или запашку соломы.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARBIER G., 1961. Évolution du potassium dans le sol et besoin des cultures en engrais potassiques. *Bull. A. F. E. S.*, janvier, 22-31.

BOLTON J., PENNY A., 1968. The effects of potassium and magnesium fertilizers on yield and composition of successive crops of rye-grass, clover, sugar beet, potatoes, kale and barley on sandy soil at Woburn. *J. Agric. Sci.*, **70**, 3, 303-12.

JACQUARD P., CROISIER L., MONNIER G., 1969. Étude des effets résiduels des cultures fourragères sur les cultures arables. I. Effets résiduels de la luzerne sur le blé et le maïs. *Ann. agron.*, **20** (4), 371-433.

# ANNEXE I

## ANALYSE D'EXPÉRIENCES CYCLIQUES SUR LES ROTATIONS

L'analyse d'expériences cycliques sur les rotations pose un certain nombre de problèmes dans le domaine des techniques statistiques (1). Dans ces expériences, les cultures se succèdent selon des cycles définis de C années (dans l'exemple analysé dans le texte : C = 2), pendant N années. Il y a $r$ répétitions de $t$ rotations.

En ce qui concerne les *composantes de la variance*, les corrélations entre les erreurs des valeurs de rendement de cultures annuelles revenant sur les mêmes parcelles dans les expériences à long terme sont généralement faibles et positives. Elles dépassent rarement 0,5 et sont souvent plus petites. Bien que faibles, ces corrélations ont une importance. Si elles sont ignorées, la variance de la moyenne de $n$ valeurs de rendement provenant de la même parcelle pour N années différentes est sous-estimée. L'évolution différentielle des parcelles dans les blocs apparaît faible.

Par conséquent, on peut tenir compte, de façon appropriée, des corrélations se manifestant dans les expériences de rotations comportant des cultures annuelles en considérant les erreurs expérimentales sur les valeurs de rendement comme la somme de deux parties, dont l'une est constante pour toutes les années, de variance $\sigma^2 p$ d'une parcelle à l'autre, et l'autre est indépendante d'une année à l'autre, de variance $\sigma^2 w$.

*L'estimation de ces variances pour des rotations de longueur égale* conduit à une analyse particulièrement simple, quand les séquences (suites de cultures) sont arrangées en C séries et qu'il y a un seul groupe de rotations. Quand $N \leqslant C$, toutes les variances peuvent être exprimées en termes de $\sigma^2 p + \sigma^2 w$. Quand $N > C$, $\sigma^2 p$ et $\sigma^2 w$ sont estimées en décomposant la somme des carrés de l'erreur totale en deux parties, une somme des carrés de l'erreur parcellaire provenant des totaux parcellaires et une somme des carrés de l'erreur parcelle × année.

Il y a $(t-1)(r-1)$ degrés de liberté pour l'erreur chaque année, formant un total de $N(t-1)(r-1)$ degrés de liberté pour l'ensemble des années. Pour chaque série de parcelles affectée à une séquence, une table à double entrée, répétitions × rotations des totaux parcellaires est construite et l'on calcule la somme des carrés répétitions × rotations à l'aide des diviseurs appropriés pour les carrés des totaux parcellaires. Le total de ces sommes des carrés pour l'ensemble des C séries est la somme des carrés de l'erreur parcellaire avec $C(t-1)(r-1)$ degrés de liberté ; la somme des carrés

(1) Voir : MATERSON H. D., (1963). Theory of cyclic rotation experiments. *J. Royal Stat. Soc.*, **25**, 1, 1-45.

de l'erreur parcelle × année est obtenue par soustraction. Les valeurs attendues des carrés moyens sont donc :

| | DL | C·M | E(C·M) |
|---|---|---|---|
| | — | — | — |
| Erreur parcellaire | $C(t-1)(r-1)$ | $Mp$ | $N\sigma^2\ p/C + \sigma^2 w$ |
| Erreur parcelle × année | $(N-C)(t-1)(r-1)$ | $Mw$ | $\sigma^2 w$ |
| Erreur totale | $N(t-1)(r-1)$ | | $\sigma^2 p + \sigma^2 w$ |

Les estimées de $\sigma^2 p$ et $\sigma^2 w$ sont, par conséquent, $C(Mp - Mw)/N$ et $Mw$ respectivement. La méthode est efficace quand N est un multiple de C ; elle l'est très peu dans les autres cas.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (3), 269-286.

# COMPARAISON DE DIVERSES ROTATIONS SUR SOL LIMONEUX MAL STRUCTURÉ ; EFFET AMÉLIORANT DES CULTURES FOURRAGÈRES

J.-R. MARTY et S. FIORAMONTI
avec la collaboration de A. HILAIRE et M. CABELGUENNE [1]

*Station d'Agronomie, 67 Bd. Deltour, 31 - Toulouse*
*Institut national de la Recherche agronomique*

## RÉSUMÉ

Sur des sols limoneux, présentant des caractères physiques et mécaniques défavorables aux cultures, ont été comparées 5 rotations, en présence ou non d'irrigation :

— rotations céréalières : maïs continu, maïs-blé, maïs-blé-sorgho,

— rotations fourragères ou avec introduction de la prairie : fétuque pendant 3 ans suivie de céréales, ray-grass-maïs-blé.

En quatrième année, une culture-test d'orge a été installée sur l'ensemble des parcelles.

En comparant les rendements des différentes cultures sèches ou irriguées, nous constatons :

— la faible potentialité de ces sols en culture sèche,

— l'efficience élevée de l'eau apportée par l'irrigation, mais la faible rentabilité économique de cette technique par suite des contraintes imposées par ce type de sol,

— les meilleurs rendements de la culture-test d'orge après prairie.

L'étude des caractéristiques structurales de sol sous les différentes cultures met en évidence l'effet améliorant des cultures fourragères sur les propriétés physiques (tests de stabilité S et K de HÉNIN). Le niveau humique se trouve aussi nettement relevé après 3 ans de prairie, notamment en l'absence d'irrigation.

Les contraintes hydriques et structurales liées à ces limons peu profonds, imposent donc un système de culture fourrager pour ces terres dont la vocation en grande culture est en premier lieu la production de l'herbe.

[1] *Services de Développement agricole de la Haute-Garonne.*

## INTRODUCTION

Les sols issus des alluvions fluviatiles anciennes du sud-ouest de la France, appelés boulbènes, possèdent une texture limoneuse avec un faible taux d'argile à capacité d'échange peu élevée. Il en découle des caractères physiques et mécaniques défavorables qui constituent le facteur limitant essentiel de ces terres (J.-R. MARTY, 1969) :

— mauvaise structure de surface, et faible perméabilité des sous-sols,
— tendance marquée à la battance,
— voies de circulation de l'eau et de l'air peu efficaces,
— perte de portance dès que la capacité au champ est atteinte, et, à ce taux d'humidité, tendance au tassement (« effondrement de la structure »).

Parmi l'ensemble des boulbènes, certaines sont peu profondes (boulbènes sur grep consolidé ou non) et possèdent généralement les caractères défavorables les plus accusés.

Les différences au sein de ce type de sol portent essentiellement sur la présence ou l'absence d'éléments grossiers (cailloux et graviers) à partir de la surface, ainsi que sur la profondeur du grep (entre 30 et 50 cm), caractères influençant le comportement hydrique et la potentialité. Ces terres couvrent environ 80 000 ha dans la région Midi-Pyrénées.

Il y a longtemps que les praticiens avaient reconnu la vocation fourragère de ces zones où les prairies représentaient environ 50 p. 100 des terres labourables en excluant la vigne (RISLER, 1894).

Depuis quelques années, la prairie tend à disparaître alors que les possibilités de rendements sont faibles en blé et en maïs. De plus, l'absence de prairie dans l'assolement provoque une dégradation rapide des propriétés structurales de ces sols limoneux. Actuellement se pose donc le problème des systèmes de culture à pratiquer et la place que l'herbe doit y tenir.

L'irrigation permet d'augmenter dans de larges proportions les rendements des cultures d'été. Elle apparaît ainsi comme une technique d'autant plus séduisante que la topographie plane de ces terres et leur situation favorisent leur équipement hydraulique.

Mais, comme pour les cultures sèches, se pose le problème du système de culture irriguée qui soit à la fois le mieux adapté au milieu, et économiquement rentable.

Pour ces raisons, nous avons été conduits à implanter sur une boulbène typique, peu profonde, un dispositif expérimental dont le but était de dégager l'influence des différentes rotations sur les rendements des diverses cultures sèches ou irriguées, ainsi que sur l'évolution du comportement physique et hydrique du sol au cours d'années climatiques différentes. Nous nous sommes efforcés de maintenir les autres facteurs de production sensiblement équivalents pour chacune des répétitions et, autant que possible, à l'optimum réalisable en grande culture : travail du sol, variétés, fertilisation, traitements, irrigations.

Ce sont les résultats obtenus à partir de cet essai, mis en place à l'automne 1965, et les premières conclusions qui en découlent, que nous nous proposons de présenter.

TABLEAU I

*Caractéristiques du sol*

| Profondeur en cm | Cailloux graviers p. 100 de terre totale | Granulométrie en p. 100 de terre fine sèche | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Différentes classes en mm | | | | |
| | | 2-0,2 | 0,20-0,05 | 0,05-0,02 | 0,02-0,002 | < 0,002 |
| 0-20 | 18 | 8,7 | 16,8 | 38,4 | 22,5 | 11,2 |
| 35-50 (grep) | 60 | 22,4 | 11,5 | 21,5 | 18,2 | 25,7 |

*Analyse chimique*

| Profondeur en cm | pH (1) | P. 1 000 de terre fine sèche | | | | | | Capacité d'échange en méq/ 100 g de terre |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Azote | $P_2O_5$ assimilable | Bases échangeables | | | | |
| | | | | $K_2O$ | CaO | MgO | $Na_2O$ | |
| 0-20 | 5,6 | 0,55 | 0,030 | 0,065 | 0,44 | 0,064 | 0,009 | 5.1 |
| 35-50 | 6,1 | 0,35 | 0,018 | 0,070 | 1,09 | 0,24 | 0,021 | 11,5 |

(1) Avant apport d'amendement calcaire.

*Caractéristiques physiques et hydriques*

| Profondeur en cm | Test d'instabilité structurale | | Teneurs en eau en p. 100 | | | | Indice de plasticité | Réserves utilisables en mm sur 50 cm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | S | K | A la capacité au champ | Au pF 4,2 | A la limite liquidité | A la limite plasticité | | |
| 0-20 | 12,5 | 1,04 | 15,5 | 4,9 | 19,5 | (1) | 0 | 55 (2) |
| 35-50 | 14,0 | 1,02 | 18,4 | 11,9 | 23,5 | 16,8 | 6,5 | |

(1) Non plastique.

(2) Les réserves hydriques totales utilisées sous fétuque non irriguée ont été de 85 mm pour une profondeur d'enracinement de 70-75 cm et des mesures effectuées jusqu'à 1,15 m.

## I. — CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

### 1. *Le sol.*

Il correspond à une boulbène peu profonde sur grep, située à Plaisance-du-Touch sur des alluvions anciennes de la Garonne.

a) *Résultats analytiques.*

Les principaux caractères du sol figurent au tableau 1.

b) *Observations de profils culturaux* (printemps 1965).

De 0 à 20 cm — horizon caillouteux avec de nombreux débris organiques peu décomposés. Structure continue à tendance polyédrique de très faible cohésion. Nombreuses croûtes de battance enfouies, à structure feuilletée. Hydromorphie caractérisée dès la surface par des gaines de rouille aux racines, et des zones réductrices avec taches de gley.

De 20 à 35 cm — horizon caillouteux, compact. La structure a une tendance plus marquée vers une polyédrique fine de meilleure cohésion. L'hydromorphie et la marmorisation sont très poussées et caractéristiques d'un horizon à pseudo-gley. Présence de nombreuses concrétions ferro-manganiques.

De 35 à 50 cm — horizon très caillouteux, avec de nombreux graviers et concrétions noirâtres réunis par un ciment limono-argileux. L'ensemble est compact, difficilement friable, mais renferme cependant de fines radicelles saines.

Au-dessous, horizons comparables se différenciant par la taille et la quantité de cailloux et par une terre fine plus argileuse.

Donc, pour les différentes rotations, nous étions en présence d'un sol peu profond, à texture limoneuse homogène, à faible réserve hydrique, caractérisé par un défaut de structure construite et stable.

### 2. *Le climat*

Nous caractérisons le climat par l'écart entre l'ETP mesurée et les précipitations, décompté par séries de 4 mois, d'octobre à septembre (année agricole). Les périodes excédentaires en eau sont décomptées en résultats positifs, les périodes déficitaires en négatifs (voir tabl. 2)

Ces résultats proviennent de mesures effectuées à proximité de l'essai. On peut constater la grande variabilité du climat, d'où la difficulté de fournir des valeurs correspondant à des années « normales ». Par rapport aux données climatiques moyennes, les écarts en valeur absolue d'une année à l'autre et les différences de répartition dans le temps des excédents ou des déficits sont tels, qu'il est contestable d'attacher une signification agricole à l'année « moyenne ».

TABLEAU 2

*Caractères climatiques* (ETP — P)

| Année | Mois | | | Déficit annuel |
|---|---|---|---|---|
| | O N D J | F M A M | J J A S | |
| | mm | mm | mm | mm |
| 1965-66 | + 262 | — 86 | — 494 | — 318 |
| 1966-67 | + 256 | — 255 | — 639 | — 638 |
| 1967-68 | + 51 | — 24 | — 232 | — 204 |
| 1968-69 | + 107 | + 23 | — 380 | — 250 |

Nous précisons donc les caractéristiques climatiques de chacune des années car elles influencent directement les rendements des cultures d'hiver ou d'été ainsi que la production de l'herbe.

### 3. *Les rotations*

Nous nous proposions de comparer 5 rotations, établies sur 5 ans, mais les premiers résultats obtenus dès la 3e année nous incitèrent à couvrir l'ensemble de l'essai, à l'automne 1968, d'une culture-test uniforme d'orge dans le but de réaliser un premier bilan.

Les rotations comparées seront donc les suivantes :

| Référence | 1965-66 | 1966-67 | 1967-68 | 1968-69 |
|---|---|---|---|---|
| M M M O | maïs | maïs | maïs | orge |
| M B S O | maïs | blé | sorgho | orge |
| R M B O | ray-grass | maïs | blé | orge |
| F F F O | fétuque | fétuque | fétuque | orge |
| B M B O | blé | maïs | blé | orge |

Précisons que ces rotations succédaient à un jeune verger de pêchers plantés sur arrachage de vigne.

Cet ensemble fut réalisé sur des parcelles rectangulaires de 40 m sur 5 m disposées suivant le système des blocs avec 4 répétitions.

Le travail du sol et les traitements ont été conduits dans chaque série de rotations suivant les techniques courantes appliquées en grande culture.

Les variétés utilisées pendant la durée de l'essai furent pour le blé : *Étoile de Choisy*, pour le maïs : *Iowa 4417*, pour l'orge : *Monlon*, pour les prairies : fétuque élevée *Manade* et Ray-Grass d'Italie *Rina*.

### 4. *La fertilisation*

Un apport d'amendement calcaire a été réalisé au préalable, de manière à amener le pH au voisinage de 7.

Compte tenu de la pauvreté du sol, nous nous sommes efforcés d'assurer une fertilisation NPK suffisamment copieuse, de telle sorte qu'elle ne puisse être considérée comme facteur limitant les rendements.

Tous les résidus de récolte furent enfouis sur les parcelles correspondantes, sauf en 1968.

Les bilans globaux fertilisation-exportation figurent au tableau 3 ; ils sont largement excédentaires dans l'ensemble. Toutefois, sur la fétuque irriguée (rotation FFFO), les bilans sont négatifs pour l'azote et la potasse. Cela résulte de l'absence d'apport après les dernières coupes de 1967 et de 1968, permettant de couvrir complètement les exportations importantes en culture irriguée. Ce léger déficit n'a apparemment pas eu de répercussion sensible sur la production de fétuque en culture irriguée.

### 5. *L'irrigation*

L'irrigation a débuté en 1966 au moyen de rampes oscillantes, aménagées pour obtenir de faibles débits horaires (4 mm/heure) arrosant le cinquième de la longueur des parcelles. L'évapotranspiration potentielle (ETP) était mesurée sur une parcelle voisine au moyen d'évapo-transpiromètres cultivés en fétuque. L'ETM du maïs était calculée à partir de l'ETP et de coefficients de correction faisant intervenir le stade de développement de la culture ; les données ainsi obtenues étaient contrôlées par des mesures de consommation d'eau par l'humidimètre à neutrons. Sur les zones sèches, ce dernier nous permettait de suivre l'évolution des bilans hydriques et de déterminer l'ETR du maïs. Nous pouvions ainsi choisir le taux de couverture des besoins maxima du maïs, et, compte tenu des réserves hydriques utilisées dans le sol, décider du rythme des irrigations et des quantités d'eau à apporter.

TABLEAU 3

*Bilan fertilisation-exportation*
*à partir de l'automne 1965 jusqu'à la récolte de l'orge 1969*

| Rotation | Traitement | En kg d'élément à l'ha | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Fertilisation globale | | | Exportation totale | | |
| | | N | P | K | N | P | K |
| MMMO | sec | 485 | 500 | 620 | 109 | 17 | 15 |
| | irrigué | | | | 329 | 59 | 184 |
| MBSO | sec | 430 | 390 | 490 | 118 | 19 | 18 |
| | irrigué | | | | 263 | 50 | 165 |
| RMBO | sec | 460 | 490 | 550 | 156 | 23 | 179 |
| | irrigué | | | | 260 | 44 | 201 |
| FFFO | sec | 710 | 500 | 600 | 543 | 66 | 595 |
| | irrigué | 810 | 700 | 900 | 922 | 93 | 1 029 |
| BMBO | sec | 410 | 440 | 440 | 82 | 16 | 17 |
| | irrigué | | | | 183 | 36 | 39 |

(B = blé, F = fétuque, M = maïs, O = orge, R = Ray-grass, S = sorgho) ; (exception faite pour la rotation F F F O, il n'y a pas eu de différenciation entre les zones sèches et irriguées).

## II. — RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 1. *Rendements des différentes cultures*

a) *Résultats globaux en culture sèche.*

Les rendements des différentes cultures figurent au tableau 4.

Compte tenu des éléments climatiques fournis précédemment, nous constatons que les rendements des différentes cultures sur ce type de sol sont liés étroitement à l'eau, soit par excès avec les inconvénients mécaniques et physiologiques qui en découlent, soit par déficit auquel les cultures d'été sont extrêmement sensibles.

En 1966, une fin d'hiver pluvieuse, suivie d'un printemps chaud a permis un bon démarrage de l'herbe ; il s'ensuit des productions importantes des premières coupes ainsi que des rendements en blé satisfaisants pour ce sol. Les rendements en maïs sont faibles par suite d'un déficit estival relativement important (— 494 mm).

En 1967, année sèche, le déficit hydrique climatique a débuté tôt (mars) ; il a été intense dès le printemps (— 255 mm) pour s'accentuer en été (— 639 mm). Il en est résulté une baisse des rendements de l'herbe en culture sèche, ainsi qu'en blé. Les maïs ont fourni de très faibles rendements, sans écart statistiquement significatif à P = 0,05 selon les différents précédents.

Cette année, les conditions très dures d'implantation du maïs ont créé des hétérogénéités de levée et de croissance des jeunes plants, quelles que soient les par-

celles, ce qui explique la variabilité importante des rendements entre parcelles. Remarquons cependant la tendance à des rendements plus élevés du maïs venant après Ray-Grass, par rapport à ceux succédant à un blé ou à un maïs ; cela confirme le meilleur comportement général des plants de maïs que nous avons pu observer sur ces parcelles.

TABLEAU 4

*Rendements moyens obtenus en culture sèche*

— pour les prairies en q/ha de matière sèche
— pour blé, orge, maïs, sorgho, en q/ha de grain sec

| | MMMO | MBSO | RMBO | FFFO | BMBO |
|---|---|---|---|---|---|
| | *maïs* | *maïs* | *ray-grass* | *fétuque* | *blé* |
| 1965<br>1966 | 10,3 | 13,8 | 82<br>(4 200 UF en 2 exploitations) | 90<br>(4 000 UF en 2 exploitations) | 27,3 |
| | *maïs* | *blé* | *maïs* | *fétuque* | *maïs* |
| 1966<br>1967 | 6,3 | 14,2 | 9,2 | 67<br>(3 700 UF en 3 exploitations) | 6,0 |
| | *maïs* | *sorgho* | *blé* | *fétuque* | *blé* |
| 1967<br>1968 | grêlé (1) | 16,8 (2) | grêlé (1)<br>(estimation 20 q) | 82<br>(4 250 UF en 4 exploitations) | grêlé (1) |
| | *orge* | *orge* | *orge* | *orge* | *orge* |
| 1968<br>1969 | 22,5 | 18,2 | 16,0 | 29,2 | 12,8 |

(1) Violent orage de grêle du 10 juillet 1968.
(2) A titre indicatif, le sorgho a été grêlé mais non complètement détruit.

En 1968, un printemps légèrement pluvieux et chaud, avec des pluies bien réparties, a favorisé l'obtention de rendements élevés en herbe et on pouvait escompter des rendements en blé satisfaisants. Par contre, l'excès d'humidité a provoqué un retard important des semis de maïs. A cause d'un orage de grêle intervenu avant les contrôles de récolte de céréales, nous ne pouvons comparer que les rendements en herbe. En culture non irriguée, 4 coupes ont fourni des rendements sensiblement identiques aux 2 coupes de printemps de 1966. Sur toutes les zones, sèches ou irriguées, la dernière coupe a eu lieu le 9 septembre par suite des nécessités de préparation du sol en vue de l'implantation de l'orge. Il manque donc au moins une coupe, ce qui explique les rendements globaux moins importants qu'en 1967 malgré une année où le déficit climatique a été le plus faible.

En 1969, les rendements de l'orge, sur lesquels nous reviendrons, sont les meilleurs après fétuque, les plus faibles après blé.

b) *Incidence de l'irrigation.*

Sur ces sols peu profonds, les réserves en eau ne sont pas capables de satisfaire longtemps l'alimentation de la plante et les périodes de sécheresse affectent sévérement les rendements. L'irrigation, en comblant le déficit en eau, devrait donc permettre, *a priori*, de redresser efficacement cette situation. Mais, sur ces terres dégradées, les précautions à prendre pour éviter les ennoyages et les accidents de structure rendent cette technique particulièrement délicate. D'autre part, les possibilités de bonne implantation des cultures sont faibles, notamment l'obtention de peuplements forts et réguliers.

Dans les conditions de l'essai, en petite surface, les rendements sont probablement surestimés par rapport à ceux qui seraient obtenus sur l'ensemble d'une exploitation. Pour 1966, 1967 et 1968, les rendements en culture irriguée figurent au tableau 5.

TABLEAU 5

*Rendements moyens en culture irriguée*

| Années | Maïs | | | | | | Fétuque | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ETR/ETM % (4) | Irrigation (mm) | Nombre d'irrigations | Rendements en grains secs (q/ha) | | | ETP (1) | Irrigation (mm) | Rendements en matière sèche (q/ha) | UF |
| 1966 | 64 | 170 | 8 | MMMO 42,2 | | MBSO 43,3 | 873 | non irrigué | | |
| 1967 | 78 | 280 | 17 | MMMO 66,7 | RMBO 71,3 | BMBO 68,6 | 943 | 470 en 26 irrigations | 164 en 5 exploitations | 9 600 |
| 1968 | 100 | 404 | 25 grêle | ..... | 107 (2) | ..... | 480 (3) | 235 en 14 irrigations | 139 en 4 exploitations | 7 190 |

(1) 1er mai au 30 septembre.
(2) Hors essai sur parcelle évapotranspiromètre.
(3) Du 16 avril au 9 septembre.
(4) Pourcentage de couverture des besoins maximaux en eau du maïs.

En maïs, il est donc théoriquement possible d'atteindre la potentialité de la variété lorsque les besoins en eau sont totalement satisfaits, mais les contraintes imposées à l'irrigation sont telles que la rentabilité de l'opération est très discutable, surtout si l'on considère les risques à surmonter (COMBRET *et al.*, 1969).

En fétuque, malgré une irrigation moins intensive, nous approchons de manière plus régulière la production potentielle de 10 000 UF et les risques à courir sont moindre une fois la culture installée.

c) *Calendrier de production de l'herbe.*

Les résultats des 3 ans de fétuque et de la première année de Ray-Grass sont portés à la figure 1. En culture sèche, nous observons une chute de production qui s'étale de la première décade d'août au plus tard, à la deuxième quinzaine d'octobre au plus tôt. L'époque de la plus forte production débute en avril et se termine en juin, ce qui pose des problèmes d'utilisation soit en vert (défaut de portance) soit en sec

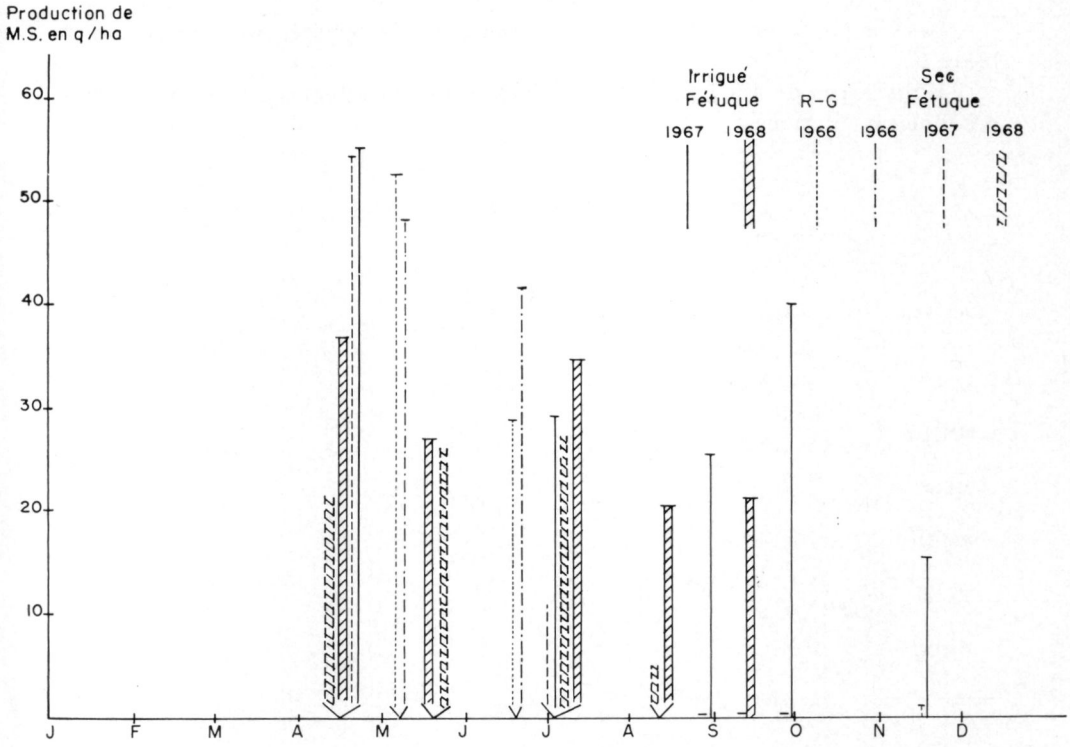



FIG. 1. — *Calendrier fourrager*

(difficulté de séchage). En culture irriguée, on maintient une production estivale malgré une chute de rendement pendant la période la plus chaude due à la variété réagissant mal aux fortes ETP. On observe cependant une meilleure répartition de la production au cours de l'année, et la possibilité de coupes tardives. Celles-ci risquent d'entraîner une diminution des rendements au printemps suivant, aggravée ici par un léger déficit en fumure azotée.

### 2. *Résultats de la culture-test d'orge*

a) *Observations à la levée et au cours de l'hiver.*

Le semis de l'orge fut assuré dans les mêmes conditions sur toutes les parcelles, après une préparation fine du sol réalisée à la même époque. Malgré cette uniformité d'implantation, nous avons observé une hétérogénéité de levée suivant les parcelles

de 160 à 258 pieds au m², sans que l'on puisse établir de relation statistiquement significative entre les rotations d'une part et les zones sèches ou irriguées d'autre part.

Le comportement de l'orge au cours de l'hiver ne révèle pas de différences notables suivant les rotations, exception faite pour la coloration de la végétation, celle-ci était plus verte en début d'hiver sur les parcelles après blé. Ces différences se sont estompées dès la première décade de mars.

b) *Rendements de la culture-test.*

Les composantes du rendement, déterminées à la récolte, sont portées au tableau 6.

Il n'y a pas de différences significatives entre les traitements « secs ou irrigués » des diverses rotations.

TABLEAU 6

*Composantes du rendement de l'orge*

| Rotations | Traitements | Au m² | | Poids du grain sec par épi en g | Poids de 1 000 grains en g | Rendements q/ha | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Nombre d'épis | Poids des épis en g | | | Paille et balles | Grain sec |
| MMMO | sec..... | 349 | 318 | 0,645 | 33,3 | 25,3 | 22,5 |
| | irrigué ..... | 349 | 293 | 0,580 | 34,3 | 25,4 | 20,3 |
| MBSO | sec..... | 238 | 267 | 0,770 | 36,8 | 20,8 | 18,2 |
| | irrigué ..... | 251 | 263 | 0,810 | 35,5 | 20,5 | 20,4 |
| RMBO | sec..... | 211 | 213 | 0,760 | 34,6 | 21,6 | 16,0 |
| | irrigué ..... | 220 | 215 | 0,650 | 33,3 | 21,9 | 14,3 |
| FFFO | sec..... | 300 | 401 | 0,980 | 35,2 | 23,5 | 29,2 |
| | irrigué ..... | 318 | 370 | 0,890 | 34,6 | 23,2 | 28,1 |
| BMBO | sec..... | 177 | 182 | 0,720 | 35,3 | 20,9 | 12,8 |
| | irrigué ..... | 161 | 142 | 0,680 | 34,6 | 21,9 | 10,9 |

La meilleure homogénité de population en tiges et en épis se recontre en FFFO où les écarts sur les moyennes sont les plus faibles : coefficient de variation de la population égal à 14 en FFFO, et variant de 16 à 36 pour les autres rotations.

Les nombres d'épis sont les plus élevés après maïs, les plus faibles après blé. Le poids des épis et le poids du grain par épi sont nettement plus élevés en FFFO, la grosseur des grains étant sensiblement la même sur les différentes parcelles.

Le rendement en grain de FFFO est statistiquement le meilleur de tous. Il est supérieur ($P = 0{,}01$) à RMBO et à BMBO qui sont égaux, et supérieur ($P = 0{,}05$) à MMMO et à MBSO qui sont équivalents. La différence entre MMMO et MSBO d'une part, et RMBO et BMBO d'autre part, n'est pas significative ($P = 0{,}05$).

Il y a donc un ensemble de conditions qui a joué au cours du temps et différemment selon les rotations, à la fois sur la levée, le tallage, la récession des talles, etc.. En fait, les facteurs favorables qui se sont conjugués après fétuque ont abouti à une meilleure alimentation de l'épi, notamment à un plus grand nombre de grains par épi.

### 3. *Répercussion de ces cultures sur les caractéristiques structurales du sol*

a) *Observations sur l'enracinement.*

Du fait de la présence de nombreux cailloux et graviers, les mesures de densité d'enracinement ont dû être réalisées au moyen du densitomètre à membrane. Celles-ci, effectuées dès la 1re année (juin 1966) sur ray-grass, fétuque et blé, sont représentées sur la figure 2.

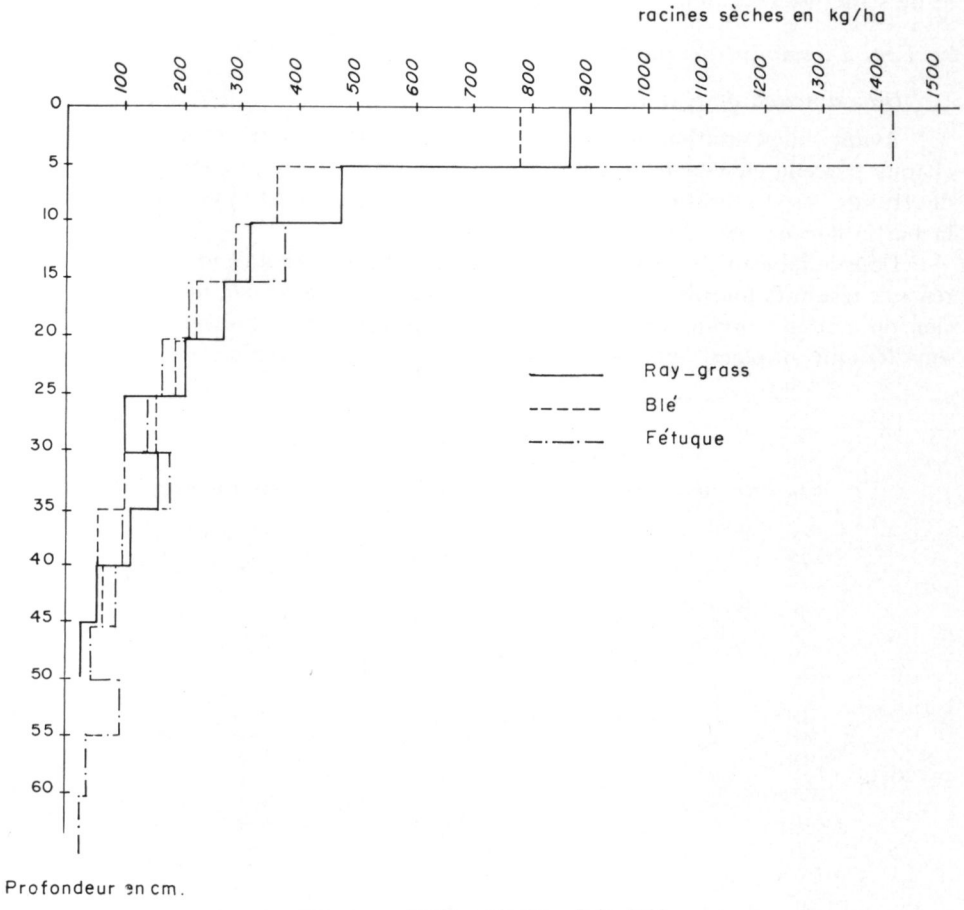



FIG. 2. — *Profils racinaires. Juin 1966*

A cette époque, nous avons pu observer de nombreuses racines rouillées, notamment entre 5 et 15 cm, dues probablement aux ennoyages de l'hiver. Cependant, la densité d'enracinement est relativement élevée pour les 3 cultures si on la compare à celle observée dans des sols ne présentant pas d'obstacles à l'élaboration d'un enracinement sain et abondant (alluvions récentes sableuses du Tarn où on a obtenu 2 230 kg/ha de racines de ray-grass sur 1 mètre de profondeur).

La fétuque possède la densité d'enracinement la plus élevée, notamment sur les 10 premiers cm, et ses racines ont tendance à s'enfoncer plus profondément malgré l'abondance des éléments grossiers à partir de 45 cm.

Dès sa première année d'implantation, la fétuque possède donc un système radiculaire abondant qui s'est ensuite révélé résistant aux conditions défavorables du milieu. En effet, des profils culturaux examinés en avril 1967 montrent que, sous fétuque, les racines sont saines et uniformément réparties jusqu'à 40 cm, et qu'en outre, une structure grumeleuse s'est constituée autour des racines. Par contre, sous blé, après maïs, l'enracinement est rouillé, chétif, dans un milieu plus compact et de structure continue.

b) *Tests d'instabilité structurale* (HÉNIN *et al*, 1960).

*Détermination de S et K.*

Avant l'implantation de l'orge, des prélèvements de terre furent effectués sur chaque parcelle en vue de la détermination des tests de stabilité structurale S et K de HÉNIN, sur les parties irriguées et non irriguées sous fétuque, uniquement sur la partie non irriguée dans les autres parcelles.

Dans le tableau 7 sont portés les résultats moyens par rotation, qui sont comparés aux résultats fournis par des parcelles voisines menées en sol nu et sans restitution de matières organiques, et aux résultats provenant de prélèvements effectués sous fétuque en place depuis 4 ans (autour des évapotranspiromètres).

TABLEAU 7

*Tests d'instabilité structurale S et K*

*Prélèvements de septembre 1968* (moyenne de 4 répétitions)

| Rotations | S | | | K | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0-10 cm | 10-20 cm | 20-30 cm | 0-10 cm | 10-20 cm | 20-30 cm |
| MMMO | 5,93 | 5,19 | 5,68 | 1,27 | 1,53 | 1,46 |
| MBSO | 5,65 | 5,39 | 6,36 | 1,58 | 1,20 | 1,10 |
| RMBO | 6,51 | 5,83 | 5,70 | 0,97 | 1,08 | 1,25 |
| FFFO sec | 2,89 | 3,89 | 3,78 | 1,58 | 1,50 | 1,43 |
| FFFO irrigué | 2,90 | 3,89 | 4,27 | 2,02 | 1,69 | 1,65 |
| BMBO | 5,48 | 5,29 | 6,08 | 0,99 | 1,06 | 1,14 |
| Sol nu | 12,20 | 15,32 | 15,84 | 1,06 | 0,80 | 0,93 |
| Fétuque 4e année | 1,42 | — | — | 1,54 | — | — |

| | S | K |
|---|---|---|
| Coefficient de variation : | 10 p. 100 | 14 p. 100 |
| p.p.d.s. P = 0,05 | 0,83 | 0,28 |
| P = 0,01 | 1,17 | 0,40 |

Ces résultats globaux montrent l'influence très nette du système de culture sur les propriétés structurales de ce sol. L'ensemble des parcelles de l'essai a acquis un

meilleur comportement après 3 ans de culture ; en effet, les résultats S et K sous sol nu sont restés sensiblement les mêmes que ceux trouvés après verger au moment de l'implantation de l'essai en 1965.

La stabilité structurale s'est nettement améliorée sous fétuque et, après 3 ans, les tests S et K indiquent les valeurs les meilleures par rapport à celles obtenues sur les autres rotations. Les valeurs S et K les plus satisfaisantes de toutes sont sous fétuque de 4e année et correspondent à une bonne stabilité pour ce type de sol.

Les différences observées sur l'horizon de surface (0-10 cm) sont très marquées, bien que la stabilité structurale se trouve modifiée sur les 30 premiers centimètres.

Remarquons que les résultats obtenus sous sol nu semblent indiquer une dégradation plus accentuée à partir de 10 cm, différenciation due probablement à l'absence totale d'enracinement à partir de cette profondeur.

En effet, l'enracinement joue un rôle important dans la restructuration et l'amélioration de la stabilité structurale de ce type de sol, et les meilleures propriétés physiques se retrouvent sous fétuque où l'enracinement est à la fois le plus abondant et permanent.

En tant que précédent cultural, le sorgho qui possède un enracinement puissant présente également cet effet bénéfique mais avec une intensité moindre. Par contre, le plus mauvais précédent paraît être le blé, notamment si l'on considère les résultats du test K.

Notons enfin que l'irrigation de la fétuque a amélioré la valeur de K ; là encore, nous nous trouvons en présence d'un système radiculaire important maintenu en activité au cours de la période estivale grâce à l'irrigation. Cependant, il est possible que cette amélioration de K soit surestimée. En effet, les échantillons en provenance des parcelles fétuque irriguée renfermaient apparemment davantage de débris de racines sèches et non encore décomposées, que les échantillons en provenance des fétuques sèches. Il s'ensuit que ces débris ont pu favoriser la filtration dans l'échantillon remanié et augmenter artificiellement la valeur du test K. Sans vouloir extrapoler l'interprétation de cet indice à une filtration au champ, rappelons néanmoins que nous avons pu mesurer, sur un même type de sol, une amélioration de la filtration sous prairie due à l'important système de voies de circulation préférentielles créées par les racines (MARTY et COURAU, 1969).

*Taux d'agrégats alcool, d'agrégats benzène.*

Nous discuterons uniquement les quantités d'agrégats, moins les sables grossiers, subsistant après les prétraitements alcool et benzène car ils font ressortir les 2 facteurs essentiels de la stabilité : cohésion et protection par la matière organique. Ces résultats figurent au tableau 8.

Nous remarquons la tendance à une augmentation générale du taux d'agrégats benzène dans toutes les rotations ayant porté une prairie, les prétraitements benzène faisant bien ressortir l'effet de protection de la matière organique liée à l'argile vis-à-vis des agrégats.

Les taux d'agrégats benzène sont égaux après fétuque sèche ou irriguée et sont supérieurs aux taux d'agrégats benzène des autres rotations qui possèdent des valeurs semblables ($P = 0{,}01$).

L'incidence de l'irrigation sur la stabilité structurale apparaît dans la comparaison des taux respectifs d'agrégats alcool et benzène entre fétuque sèche et irriguée.

TABLEAU 8

*Taux d'agrégats suivant différents prétraitements*

| Rotations | P. 100 d'agrégats pour la couche 0-10 cm (moyenne des 4 répétitions) | |
|---|---|---|
| | Après le prétraitement alcool | Après le prétraitement benzène |
| MMMO | 4,7 | 2,4 |
| MBSO | 5,6 | 2,8 |
| RMBO | 4,6 | 3,0 |
| FFFO sec | 9,7 | 5,3 |
| FFFO irrigué | 7,9 | 5,4 |
| BMBO | 5,1 | 2,8 |
| Signification statistique | p.p.d.s. P = 0,05 1,8<br>0,01 2,5 | p.p.d.s. P = 0,05 1,5<br>0,01 2,0 |

Ainsi, sur ce type de sol instable, pour des valeurs identiques de S, les facteurs de stabilité peuvent être différents. Le taux d'agrégats alcool plus élevé sous fétuque sèche que sous fétuque irriguée (P = 0,05) signifie que les variations importantes d'humidité en culture sèche (dessiccation poussée) ont favorisé l'édification ou la cohésion des agrégats, facilitée par ailleurs, par la présence de quantité plus importante de matière organique dans les zones sèches (voir tabl. 9).

TABLEAU 9

*Taux moyen de carbone et d'azote des différentes rotations pour la couche 0-10 cm*

| Rotations | P. 1 000 de terre fine sèche | | Valeur moyenne du rapport C/N |
|---|---|---|---|
| | Carbone total | Azote Kjeldahl | |
| MMMO | 5,47 | 0,56 | 9,8 |
| MBSO | 5,97 | 0,58 | 10,2 |
| RMBO | 6,57 | 0,59 | 11,0 |
| FFFO sec | 8,15 | 0,75 | 10,9 |
| FFFO irrigué | 7,65 | 0,69 | 10,9 |
| BMBO | 6,95 | 0,64 | 10,8 |

Par contre, l'activité plus soutenue des racines dans les fétuques irriguées aurait assuré une meilleure protection des agrégats présents, malgré une proportion moindre de matière organique. En effet, le taux d'agrégats benzène se maintient identique sous fétuque en présence ou en l'absence d'irrigation, alors que le taux d'agrégats alcool baisse sous irrigation. Ceci confirme l'efficacité spécifique de la matière organique sur la stabilité structurale, selon son état, sa qualité (MONNIER, 1965) et son activité ; celle-ci apparaît plus intense en présence d'irrigation. Notons enfin le meilleur taux d'agrégats alcool dans le précédent sorgho par rapport aux précédents maïs ou blé.

*Taux de matières organiques.*

Les taux respectifs de carbone et d'azote, ainsi que la valeur du rapport C/N, ont été déterminés pour chaque parcelle. Les moyennes obtenues pour les différentes rotations figurent au tableau 9.

Il apparaît, d'après la proportion plus élevée d'agrégats benzène après fétuque, qu'un accroissement du taux de matière organique liée participe à l'augmentation globale de matière organique dans ces parcelles, augmentation dont témoigne le taux plus important de carbone total. L'absence de différenciation statistiquement significative des rapports C/N selon les rotations confirme des résultats antérieurs observés dans ce même type de sol (MARTY, 1969, déjà cité).

Le taux d'azote actuel (tabl. 9) a légèrement augmenté par rapport à la teneur d'origine (tabl. 1). Les parcelles après fétuque possèdent les taux d'azote et de carbone les plus élevés (différence significative à $P = 0{,}01$), les autres parcelles étant statistiquement semblables.

Le taux d'azote après fétuque en culture sèche est statistiquement supérieur au taux d'azote après fétuque irriguée ($P = 0{,}01$). A ce même seuil de probabilité, la différence entre le taux de carbone après fétuque irriguée ou non irriguée n'est pas significative.

Pour l'horizon 0-10 cm, le bilan humique est plus nettement positif sous la fétuque que sous les autres rotations et cela malgré une fertilisation azotée moins abondante. En rotations céréalières, les quantités d'humus sont faibles par suite des restitutions moindres en matières organiques dues aux faibles rendements et des pertes probables des excédents d'azote minéral par le lessivage au cours de l'hiver. Par contre, sous fétuque où les risques de lessivage sont plus limités et les résidus organiques importants dans les 10 premiers centimètres, nous constatons une augmentation du taux d'azote organique qui se manifeste à la fois par rapport aux autres systèmes de culture et par rapport au niveau initial. D'autre part, pour l'horizon 10-20 cm, nous retrouvons entre les rotations, des différences analogues à celles décrites pour l'horizon 0-10 cm, mais avec une intensité bien moindre. Il en est de même pour l'horizon 20-30 cm, mais avec des écarts entre parcelles encore plus atténués.

En l'absence de bilan réalisé sur l'ensemble du profil, cette augmentation du taux d'azote peut être attribuée soit à une fixation non symbiotique dans ce milieu riche en carbone organique et donc en énergie disponible, soit à une redistribution de l'azote du profil au bénéfice de la couche superficielle. Quels que soient les mécanismes mis en œuvre, ils jouent tous en faveur d'une amélioration globale des propriétés physiques de l'horizon de surface, condition importante dans le cas de ces sols battants.

En ce qui concerne la différence de teneur en azote après fétuque irriguée et après fétuque en culture sèche, on peut penser qu'un ensemble de facteurs a contribué à une élaboration moindre d'humus sous les zones irriguées :

- déficit en fumure azotée,
- lessivage éventuel plus important,
- teneur en azote des racines de fétuque irriguée plus faible, donc un C/N de matières organiques fraîches plus élevé et un rendement humique moindre,
- enfin, minéralisation, consommation et exportation d'azote plus importantes grâce aux conditions favorables créées par l'irrigation.

## III. — CONCLUSIONS

Nous avons pu contrôler des rendements différents d'une culture-test d'orge après divers systèmes de culture maintenus durant 3 ans et ayant entraîné des modifications de comportement du sol.

Nous avons tenté d'expliquer par des observations plus approfondies certains mécanismes réels mis en jeu. Pour ces terres de boulbènes, la relation entre la rotation des cultures et les propriétés structurales du milieu est mise en évidence. Le plus mauvais rendement de l'orge se retrouve après blé. Malgré un bon comportement en début de végétation, une aggravation s'est manifestée au cours du printemps pluvieux où les conditions d'ennoyage furent accentuées par les propriétés physiques les plus mauvaises. Quoique le blé soit un précédent généralement adopté pour l'orge, ce système de rotation céréalière a abouti, dans ce type de sol, aux plus mauvais rendements et ne doit donc être conseillé qu'avec beaucoup de prudence. Remarquons l'effet bénéfique du ray-grass introduit en rotation céréalière (rotation RMBO) bien qu'il ne soit pas statistiquement significatif. Qualitativement, nous avons d'ailleurs observé une bien meilleure « tenue » du sol au cours de l'hiver qui a suivi le retournement.

Donc, en boulbènes les plus défavorables, les contraintes hydriques et structurales liées à la nature du sol imposent un système de culture fourrager.

En effet, les résultats obtenus ont montré que la fétuque a nettement amélioré les propriétés physiques du sol. Il en découle un meilleur comportement de l'orge après l'hiver et les rendements les plus élevés à la récolte. Cet effet bénéfique doit être attribué essentiellement à l'amélioration des propriétés physiques, liée à une quantité plus grande d'humus produit dans les 10 premiers centimètres et cela malgré des bilans de fertilisation les moins favorables.

Les potentialités limitées en culture sèche posent le problème de l'irrigation et apparaissent alors de nouvelles contraintes liées à cette technique.

Ainsi, dans ces sols très superficiels, l'irrigation exige des passages fréquents à faible dose et nécessite donc pratiquement une couverture totale en matériel. Compte tenu des autres contraintes d'implantation des cultures, la rentabilité devient très aléatoire et peut même faire douter de l'intérêt de l'irrigation du maïs et du sorgho.

Toutefois, l'irrigation même moins intensive d'espèces fourragères bien adaptées, permet de régulariser la production de l'herbe en période estivale et d'atteindre ainsi des rendements très intéressants.

En définitive, cet essai de 4 années a permis de contrôler la faible potentialité de ces terres (80 000 ha dans Midi-Pyrénées) en culture sèche, aussi bien pour les céréales d'hiver, très sensibles aux excédents de pluie ou aux sécheresses précoces, que pour les cultures d'été, où la moyenne des rendements en maïs grain se situe aux environs de 10 q/ha. Quant à la production fourragère, elle reste peu intensive en culture sèche à cause du « creux » estival important.

L'irrigation des cultures d'été traditionnelles, maïs et sorgho, apparaît donc très délicate et peu rentable ; l'irrigation des prairies pouvant s'accommoder d'une pratique moins intensive, présente un intérêt qui reste à estimer dans le cadre d'une utilisation rationnelle de l'herbe et d'une valorisation des UF produites. Enfin, une

étude de la place et de la productivité de cultures spéciales et coûteuses mériterait d'être réalisée dans ces conditions difficiles, et serait un moyen à ne pas négliger pour mieux valoriser ces terres dont la vocation en grande culture est en premier lieu la production de l'herbe.

*Reçu pour publication en avril 1970.*

## SUMMARY


### COMPARISON OF VARIOUS ROTATIONS ON SILTY, POORLY-STRUCTURED SOIL ; THE IMPROVING EFFECT OF GROWING FORAGE CROPS

On silty soils with physical and mechanical characteristics unfavourable to agriculture, 5 different rotations, with and without irrigation, were compared :

— cereal rotations : continuous maize ; maize-wheat ; maize-wheat-sorghum ;

— rotations of fodder crops or with introduction of pasture ; fescue for three years, followed by cereals ; rye-grass-maize-wheat.

During the fourth year, a test crop of barley was sown in all the plots.

In comparing the yields of the different crops, dry and irrigated, we note :

— the low potential yield of these soils under dry cultivation,

— the great effectiveness of the water obtained by irrigation, but the low economic returns of this method owing to the limitations of this type of soil,

— the improved yields of the test-crop barley after pasture.

A study of the soil's structural characteristics under the different crops reveals the improvement effected by forage crops on its physical properties (stability tests S and K of HÉNIN). The humic level is also definitely raised after 3 years under grass, especially when there has been no irrigation.

The hydrous and structural limitations of shallow silts therefore impose a system of fodder crop cultivation for these soils, whose chief function in large-scale farming is the production of grass.


## ZUSAMMENFASSUNG


### EIN VERGLEICH VERSCHIEDENER FRUCHTWECHSEL AUF EINEM SCHLECHT AUFGEBAUTEN LEHMBODEN ; DER VERBESSERUNGSEFFEKT VON FUTTERKULTUREN

Auf lehmigen Böden mit einer für die Kulturen ungünstigen physikalischen und mechanischen Beschaffenheit wurden 5 Fruchtwechsel mit bzw. ohne Bewässerung verglichen :

— Getreidewechsel : dauernd Mais, Mais-Weizen, Mais-Weizen-Mohrenhirse,

— Futterwechsel, auch mit Einlegung von Wiesen : während 3 Jahren Schwingel, daraufhin Getreide, und zwar Raygras-Mais-Weizen.

Im 4 Jahr, wurde eine Gersten-Testkultur auf allen Landstücken angebaut.

Beim Vergleich des Ertrags der verschiedenen trockenen oder bewässerten Kulturen stellen wir fest :

— die geringen Möglichkeiten dieser Böden bei der Trockenkultur,

— die hohe Wirksamkeit des zur Bewässerung herangebrachten Wassers, aber die geringe wirtschaftliche Rentabilität dieser Technik wegen der durch diese Art Boden auferlegten Einschränkungen,

— die besten Erträge der Gersten-Testkultur nach der Wiese.

Eine Untersuchung der Strukturkennzeichen des Bodens unter den verschiedenen Kulture zeigt die verbessernde Einwirkung der Futterkulturen auf die physikalischen Eigenschaften (HENINSCHE Beständigkeitsprüfung S und K). Das Humusniveau ist nach 3 Jahren Wiese auch deutlich angehoben, besonders aber ohne Bewässerung.

Die mit diesen untiefen Lehmen verbundenen Wasser- und Struktureinschränkungen zwingen den Böden, die in der Grosskultur in erster Linie für die Grasserzeugung bestimmt sind, ein Futterkultursystem auf.

## РЕЗЮМЕ

*Сравнительное изучение разных севооборотов на суглинистых плохо оструктуренных почвах; мелиоративный эффект кормовых культур.*

Ж. Р. МАРТИ, С. ФИОРАМОНТИ.

На орошаемых и неорошаемых суглинистых почвах, особенности физического и механического состава которых неблагоприятны для культур, было проведено сравнение между пятью трехпольными севооборотами :

— зерновые : бессменная кукуруза, кукуруза — пшеница, кукуруза — пшеница — сорго.

— кормовые : с интродукцией временных лугов : овсяница в течении трех лет, за которой следуют злаки, рай-грасс — кукуруза — пшеница.

На четвертый год, на всех делянках, в виде тестов выращивался ячмень.

Сравнивая продуктивность разных орошавшихся и неорошавшихся культур, отмечаются :

— слабая потенциальность этих почв под неорошаемыми культурами;

— сильная эффективность ирригационной воды, и вместе с тем слабая хозяйственная доходность этого приема из-за вынужденных мер диктующихся состоянием этих почв;

— лучшая продуктивность культуры ячменя в случаях когда его предшественниками были временные луга.

Изучение структурных особенностей почв под различными культурами выявляет мелиоративный эффект кормовых культур на физические свойства почв (тесты прочности Хенена S и K). Уровень содержания гумуса в этих почвах тоже сильно повышается после трехлетней луговой культуры, в частности в неорошаемых условиях.

Водное и структурное состояния этих неглубоких суглинков принуждают вводить на них системы кормовых севооборотов, призванием которых в крупном масштабе является в первую очередь травяная продукция.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


Combret M., Blanchet R., Fioramonti S., 1969. Influence de diverses modalités d'irrigation sur l'intérêt économique de la culture du maïs dans des sols possédant des réserves hydriques d'importance variable. *C. R. Acad. Agric.*, **1**, 77-84.

Hénin S., Feodoroff A., Gras R., Monnier G., 1960. *Le Profil Cultural.* Principes de physique du sol. S. I. E. A., Paris.

Marty J.-R., 1969. Les Boulbènes. Caractères et propriétés physiques. Conséquences agronomiques. Brochures I. N. R. A., 135 pages.

Marty J.-R., Courau Marielle, 1969. Influence du système de culture sur l'écoulement de l'eau dans un sol mal structuré. *Ann. agron.*, **20** (4), 361-369.

Monnier G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.* Thèse Ing. Doc., Université de Paris.

Risler E., 1894. *Géologie Agricole.* Première partie du cours d'Agriculture comparée fait à l'I. N. R. A., Tome III.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (3), 287-304.

# DÉGRADATION COMPARÉE D'UN JEUNE RAY-GRASS ENFOUI DANS UN SOL AÉRÉ OU DANS UN SOL SATURÉ D'EAU

O.-P. VIMAL (1) et E. JOLIVET

*Station centrale d'Agronomie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles*
*Institut national de la Recherche agronomique*

## RÉSUMÉ

Des jeunes plantes de ray-grass sont rendues radioactives par fixation de $^{14}CO_2$ à la lumière. Elles sont ensuite enfouies dans un sol qui est maintenu aéré ou est saturé d'eau. Après 30 et 75 jours d'incubation, à 20°C, la radioactivité est recherchée d'une part dans l'extrait hydroalcoolique du complexe sol-végétal décomposé, ses fractions acide, basique, neutre, les acides organiques d'autre part dans différentes fractions de l'humus.

La distribution du $^{14}C$ entre les divers composés, solubles et insolubles, met en évidence les faits suivants :

— la décomposition du ray-grass est très rapide dans le sol aéré et dans le sol saturé, plus rapide cependant dans le premier que dans le second ;

— les processus en jeu dans l'humification se déroulent différemment dans le sol aéré et dans le sol saturé d'eau. Toutefois, après 75 jours d'incubation, il est observé dans le sol aéré et dans le sol saturé une répartition analogue du $^{14}C$ entre les diverses fractions de l'humus.

## INTRODUCTION

Il est connu depuis longtemps que la formation de l'humus, résultant de la dégradation de la matière organique végétale enfouie dans le sol, s'accompagne de l'apparition de nombreuses substances solubles. L'identification, la détermination quantitative de ces substances ont été réalisées et les études ont montré que ces composés de faible poids moléculaire comprennent des acides aminés libres, des acides organiques, volatils ou non, des acides aromatiques, des acides uroniques, des sucres simples, réducteurs ou non. Des articles récents (BREMNER, 1967 ; STE-

(1) Adresse actuelle : Microbiology Department, I. A. R. I., New Delhi, 2 - India.

VENSON, 1967 ; GUPTA, 1967) ont fait le point de nos connaissances sur ce sujet.

Si les recherches effectuées jusqu'à maintenant ont établi que ces substances, et, en particulier les acides organiques du cycle des acides tricarboxyliques (BRÜCKERT, 1966), existent dans le sol à des teneurs très faibles, voire à l'état de traces, alors qu'ils entrent pour une bonne part dans la composition des plantes, par contre, il ne semble pas que l'étude dynamique de ces composés, c'est-à-dire leur métabolisme, au cours de la décomposition de la matière organique végétale fraîchement incorporée au sol ait été entreprise. L'absence de données en ce domaine est vraisemblablement due au fait qu'il était difficile de distinguer les composés et, en particulier, les acides organiques, préexistant dans le sol, de ceux provenant de la matière organique nouvellement ajoutée à ce sol.

Grâce à l'emploi de plantes radioactives dont l'enfouissement dans le sol a déjà servi à l'étude de divers autres problèmes (BINGEMAN *et al.*, 1956 ; BROADBENT, 1956 ; MAYAUDON et SIMONART, 1958, 1959 *a*, 1959 *b* ; SIMONART et MAYAUDON, 1958 *a*, 1958 *b* ; SIMONART *et al.*, 1959 ; GOSWAMI et DATTA, 1961 ; SÖRENSEN, 1963 ; JENKINSON, 1965), de tels travaux peuvent maintenant être abordés.

La présente note rapporte les résultats des recherches que nous avons effectuées sur la dégradation des constituants de jeunes plantes de ray-grass, rendues radioactives par incorporation de $^{14}CO_2$ gazeux à la lumière, puis enfouies d'une part dans un sol maintenu aéré, d'autre part dans un sol de même type, mais saturé d'eau. L'étude de la décomposition du ray-grass radioactif, sous ces conditions expérimentales très différentes, a été envisagée car il est connu (NORMAN, 1930) que les microorganismes réalisant la dégradation de la matière organique dans un sol aéré ne sont pas les mêmes que ceux effectuant cette dégradation dans un sol saturé d'eau ; dans le premier cas, ce sont des champignons saprophytes, des acti nomycètes, des bactéries aérobies, dans le second cas des bactéries anaérobies uniquement.

Le travail que nous avons réalisé a donc consisté à comparer, en fonction du temps écoulé après l'enfouissement du ray-grass radioactif dans un sol maintenu aéré et dans un sol de même type mais saturé d'eau, le devenir du $^{14}C$ incorporé initialement dans le ray-grass.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### I. — *Production du matériel végétal non radioactif*

La culture du ray-grass hybride, variété *Io*, est effectuée dans des petits vases de végétation (CHAMINADE, 1960, 1964). La terre utilisée est le sous-sol limoneux (pH = 6,5) des Grands-Closeaux de Versailles. La production du ray-grass est réalisée en serre à 22-23°C, sous un éclairement continu de 20 000 lux. Après un mois de culture, les jeunes plantes de ray-grass (longueur moyenne 20 cm) sont prélevées, pesées puis soumises à des incorporations de $^{14}CO_2$ gazeux.

### II. — *Préparation du matériel végétal radioactif*

Le ray-grass est rendu radioactif par une photosynthèse de 3 heures, en présence de $^{14}CO_2$ gazeux, sous un éclairement de 20 000 lux à 22-23°C, en utilisant une méthode analogue à celle décrite par COSTES (1963, 1965).

Les jeunes plantes de ray-grass sont placées debout dans une enceinte à fixation de $^{14}CO_2$ (fig. 1) dont les dimensions en mm sont les suivantes : longueur 250, largeur 30, hauteur 200. Les racines du ray-grass plongent dans un volume total d'eau de 45 ml, la hauteur d'eau dans l'enceinte étant de 6 mm.

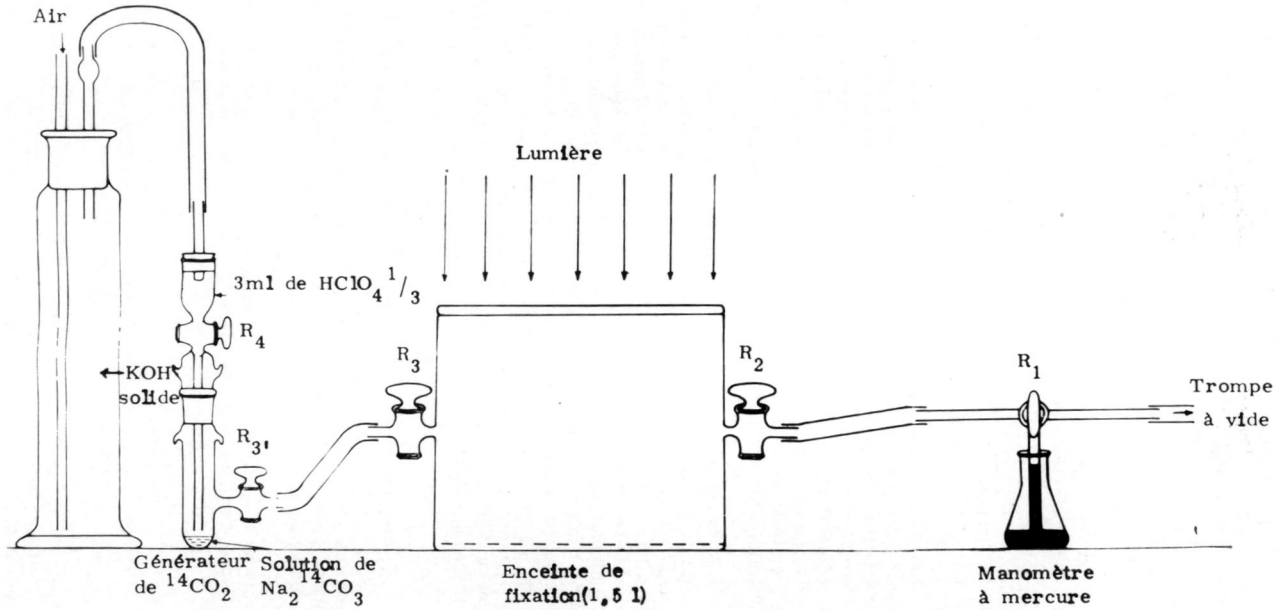



FIG. 1. — *Schéma de l'appareil utilisé pour l'incorporation de $^{14}CO_2$ gazeux*

La source radioactive ($Na_2{}^{14}CO_3$ ; C. E. A. Saclay ; radioactivité totale 500 µCi ; radioactivité spécifique 35 mCi/mmole ; concentration en $CO_2$ = 0,03 p. 100) est placée dans le générateur de $^{14}CO_2$ (fig. 1). Le $^{14}CO_2$ gazeux est libéré à partir de $Na_2{}^{14}CO_3$ par addition d'acide perchlorique dilué : $HClO_4/H_2O$ (1-2 en vol.). Le $^{14}CO_2$ dégagé est aspiré dans l'enceinte à fixation de $^{14}CO_2$ grâce à une légère dépression créée préalablement sous l'action d'une trompe à eau. La pression atmosphérique est rétablie dans l'enceinte à fixation par barbotage d'air décarbonaté.

Pour des raisons techniques, il a fallu procéder à deux incorporations de $^{14}CO_2$, à un jour d'intervalle, la première par le ray-grass destiné à être enfoui dans le sol recevant une faible quantité d'eau, la seconde par le ray-grass appelé à être enfoui dans le sol saturé d'eau.

Après les fixations de $^{14}CO_2$ (110 g de matière fraîche de ray-grass par lot), une partie du matériel végétal radioactif est prélevée pour analyses, l'autre partie étant enfouie dans le sol.

### III. — *Enfouissement dans le sol du matériel végétal radioactif*

La décomposition du ray-grass radioactif est réalisée dans un sol (pH = 7,2) bien pourvu en matière organique (C organique p. 1 000 = 35,6 ; N total p. 1 000 = 4,2 ; rapport C/N = 8,5).

Le ray-grass marqué au $^{14}C$ est mélangé, dans un dessiccateur (volume 5 l), à un sol du type précédent, séché à l'air, broyé au mortier puis passé au tamis de 2 mm.

Étant donné la difficulté du problème posé par la préparation d'un mélange d'un poids donné de ray-grass (30 g de matière fraîche) et d'un poids déterminé de sol (1 200 g de sol séché à l'air), nous avons choisi d'apporter le ray-grass au sol en adoptant le système des couches superposées.

Le ray-grass débarrassé de ses racines et le sol sont donc disposés en couches alternées : en partant du fond du dessiccateur, une couche de sol séchée à l'air (200 g), une couche de ray-grass (matière fraîche 6 g) coupé en petits fragments de 1 cm, une couche de sol, une couche de ray-grass, etc. Au total, le dessiccateur contient 1 200 g de sol séché à l'air et 30 g de ray-grass frais, dont la matière sèche, déterminée à 110°C sur du ray-grass non radioactif, représente 11,4 p. 100 de la matière fraîche.

Pour 1200 g de sol et 30 g de ray-grass, chaque dessiccateur reçoit 295 ml d'eau dans le cas du sol aéré et 1 180 ml dans le cas du sol saturé d'eau, soit respectivement 25 et 100 p. 100 de la capacité maximale de rétention du sol en eau, celle-ci étant déterminée de la manière suivante :

La terre séchée à l'air, tamisée (1 kg), est placée dans un pot en matière plastique et l'ensemble est pesé. Le sol est alors arrosé d'eau jusqu'à percolation. L'ensemble pot, sol humide est pesé puis le pot contenant le sol humide est plongé par sa base, pendant 12 h, dans un récipient d'eau de façon à saturer la terre en eau. Après égouttage, une nouvelle pesée est effectuée. Nous considérons comme capacité maximale de rétention du sol en eau, la teneur en eau ainsi déterminée. Elle est de 984 g pour 1 000 g de sol séché à l'air. Le sol aéré qui contient une quantité d'eau égale à 25 p. 100 de cette capacité maximale renferme donc encore de l'air tandis que le sol saturé en eau qui contient une quantité d'eau égale à 100 p. 100 de cette capacité maximale, renferme une teneur en air quasi nulle.

### IV. — *Incubation du matériel végétal radioactif enfoui dans le sol*

Les quatre dessiccateurs (deux pour le sol aéré, deux pour le sol saturé d'eau) sont pesés puis placés dans une serre sous un éclairement naturel, à une température moyenne de 20°C. Leur poids est contrôlé chaque jour et, si nécessaire, de l'eau est ajoutée pour maintenir ce poids constant.

Les prélèvements pour analyses (un dessiccateur de chaque catégorie) sont réalisés 30 et 75 jours après l'enfouissement du ray-grass dans le sol. Ils sont effectués sur le complexe sol-végétal décomposé.

### V. — *Déterminations analytiques réalisées sur le ray-grass radioactif, avant son enfouissement dans le sol*

Après les fixations de $^{14}CO_2$ gazeux et avant l'enfouissement du ray-grass radioactif dans le sol, il est procédé, sur une partie aliquote de ce ray-grass marqué au $^{14}C$, à la recherche de la distribution de la radioactivité entre les différents composés du matériel végétal.

Le ray-grass (matière fraîche 50 g) est stabilisé par immersion de 5 minutes dans l'éthanol bouillant et, après refroidissement, les composés solubles du matériel végétal sont extraits par des agitations successives en présence d'éthanol à 80 p. 100 (500 ml), d'éthanol à 60 p. 100 (500 ml), d'eau (500 ml) additionnée de 10 ml de résine cationique (Dowex 50, 200-400 mesh, forme $H^+$).

La résine est ajoutée afin de solubiliser les composés dont les sels sont insolubles dans l'éthanol et dans l'eau. Les différents extraits, mélangés, constituent l'extrait hydroalcoolique.

Une partie aliquote de cet extrait hydroalcoolique, correspondant à 10 g de matière fraîche, est séparée en trois fractions : basique, acide et neutre par passages successifs sur une résine cationique (Permutite 50, forme $H^+$) puis sur une résine anionique (Amberlite IRA 400, forme $CO_3^{--}$). La fraction basique, obtenue après élution par $NH_4OH$ 4N (500 ml) des composés retenus sur la Permutite 50, contient principalement les acides aminés libres. La fraction acide, obtenue après élution par une solution aqueuse de carbonate d'ammonium à 5 p. 100 (300 ml) des composés retenus sur l'Amberlite IRA 400, comprend les acides organiques. La fraction neutre, non retenue sur les deux types de résines, contient notamment les sucres.

Au cours de ce travail, il est procédé en particulier à la séparation puis à la détermination quantitative des acides organiques. Après élimination du carbonate d'ammonium sous pression réduite, à température inférieure à 40°C, les acides organiques sont séparés par chromatographie de partage sur gel de silice selon la technique mise au point par Bové et Raveux (1957). Après titration par de la soude 0,008 N, les fractions des différents acides séparés sont identifiées par chromatographie de partage sur papier en utilisant le solvant : *n*-propanol/benzoate de méthyle/acide formique/eau (7-3-2-1 en volume). Après chauffage (1 h) à l'autoclave, les taches des acides sont révélées par emploi de l'un ou l'autre des réactifs suivants :

— vert de bromocrésol (400 mg) dans l'éthanol à 95° GL (1 000 ml). La solution est amenée à coloration bleue par addition goutte à goutte de NaOH 0,5 N (Cheftel *et al.*, 1952);

— mélange, au moment de l'emploi, de volumes égaux des deux solutions suivantes (Paskova et Munk, 1960) :

solution A = vert de bromocrésol (375 mg)/bleu de bromophénol (125 mg)/éthanol absolu (500 ml) ;

solution B = $KMnO_4$ (250 mg)/$Na_2CO_3$, 10 $H_2O$ (250 mg)/eau bidistillée (500 ml).

Les radioactivités totales des extraits hydroalcooliques, celles des différentes fractions (basique, acide, neutre) et celles des divers acides organiques séparés sur gel de silice sont mesurées sur des parties aliquotes, au moyen d'un compteur à courant gazeux, automatique (Tracerlab BLS-115), dans des conditions où l'auto-absorption est négligeable. Des autoradiogrammes d'acides organiques sont préparés en mettant, pendant six semaines, les chromatogrammes au contact de films Kodirex, sans écran.

La radioactivité pouvant être incorporée, après 3 heures de photosynthèse, dans les substances du ray-grass non extraites par l'éthanol et par l'eau additionnée de résine cationique, peut être considérée comme négligeable parce que, en raison de l'âge très jeune (1 mois) des plantes de ray-grass soumises à l'expérimentation, le résidu végétal obtenu après les broyages et les extractions successifs, ne représente plus qu'une fraction très minime du ray-grass initial. Dans ces conditions, il est évident que la quasi-totalité de la radioactivité fixée par le ray-grass est distribuée dans les substances solubles du matériel végétal.

### VI. — *Déterminations analytiques réalisées sur le complexe sol-végétal décomposé, après incubation du ray-grass radioactif avec le sol*

30 et 75 jours après l'enfouissement du ray-grass radioactif dans le sol, il est procédé aux déterminations suivantes :

D'une part, afin de pouvoir mieux suivre, au cours de la décomposition du ray-grass, l'évolution du $^{14}C$ incorporé à l'origine dans les différents composés solubles : basiques, acides, neutres du matériel végétal, une partie aliquote de l'ensemble sol-végétal décomposé, prélevée après homogénéisation, est extraite par les mêmes techniques que celles utilisées (et résumées précédemment) pour l'analyse du ray-grass initial. Les acides organiques, contenus dans la fraction acide, sont séparés, comme précédemment, par chromatographie de partage sur gel de silice. Les radioactivités des extraits hydroalcooliques, obtenus après extraction par l'éthanol 80 p. 100, puis par l'éthanol 60 p. 100, puis par l'eau additionnée de résine cationique, sont mesurées comme étaient précédemment mesurées les radioactivités des extraits hydroalcooliques du ray-grass initial. Il en est de même des radioactivités des fractions basique, acide et neutre ainsi que des radioactivités des acides organiques.

D'autre part, de manière à déterminer le $^{14}C$ intégré dans l'humus et réparti entre les différentes fractions de cet humus, une autre partie aliquote du complexe sol-végétal décomposé, prélevée également après homogénéisation, est d'abord extraite par l'éthanol 80 p. 100 puis par l'éthanol 20 p. 100. Le résidu non extrait par l'éthanol aqueux est repris alors par NaOH 0,1 N et le fractionnement de la matière organique est effectué par l'emploi d'une technique analogue à celle préconisée par Mayaudon et Simonart (1958) et dont les modalités sont résumées schématiquement sur la figure 2. Le dosage des différentes fractions de l'humus n'est pas réalisé. Seules, leurs radioactivités sont mesurées, ainsi que celles des solutions éthanoliques obtenues avant traitement par la soude.

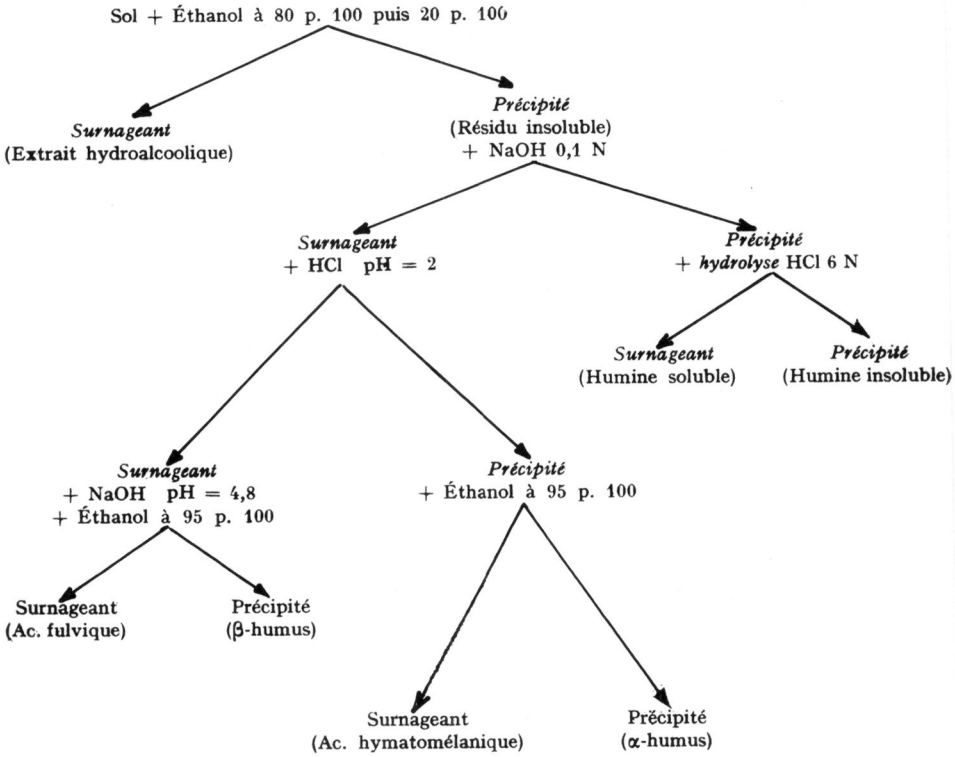



FIG. 2. — *Schéma résumant le fractionnement de la matière organique du sol*

## RÉSULTATS

### I. — *Distribution de la radioactivité dans les substances du ray-grass, avant son enfouissement dans le sol*

Les répartitions observées du $^{14}C$ dans les extraits hydroalcooliques, les trois fractions : acide, basique et neutre, les acides organiques des deux lots de ray-grass, après une photosynthèse de 3 h, en présence de $^{14}CO_2$, sous 20 000 lux, à 22-23°C, sont très semblables (tabl. 1), malgré l'existence de fluctuations qui apparaissent normales. En effet, il est évident que ces répartitions ne peuvent être identiques pour les deux lots de ray-grass, en raison de la nature biologique du matériel expérimenté et aussi du fait que les deux photosynthèses pour les deux lots de ray-grass, ont été réalisées, pour des raisons techniques, à un jour d'intervalle.

Quoi qu'il en soit, dans ces deux lots de jeunes ray-grass, le $^{14}C$ du $^{14}CO_2$ photosynthétisé se retrouve en majeure partie dans la fraction neutre. Les deux autres fractions, acide et basique, nettement moins marquées, contiennent des proportions voisines de radioactivité.

En ce qui concerne en particulier la fraction acide, le $^{14}C$ se retrouve surtout dans le malate qui présente la radioactivité spécifique la plus élevée, bien que sa

TABLEAU I

*Fixation de $^{14}CO_2$ gazeux par le ray-grass avant son enfouissement dans le sol : distribution du $^{14}C$ dans différentes fractions et dans les acides organiques*

*Conditions expérimentales* : Les fixations de $^{14}CO_2$ sont réalisées sous un éclairement de 20 000 lux, à 22 - 23° C pendant 3 heures.
Lot 1 : Ray-grass (110 g matière fraîche) $^{14}CO_2$ (RT = 500 µci ; RS = 35 mci/mM) concentration initiale en $CO_2$ = 0,03 %
Lot 2 : Ray-grass (110 g matière fraîche) $^{14}CO_2$ (RT = 500 µci ; RS = 35 mci/mM) concentration initiale en $CO_2$ = 0,03 %

*Expression des résultats* : Les teneurs en acides organiques sont exprimées en µ moles par g de matière sèche, les radioactivités totales (RT) en impulsions par minute (ipm) par µ mole.

Les pourcentages des radioactivités distribuées dans les différentes fractions et dans les acides organiques sont calculés par rapport à la radioactivité de l'extrait hydroalcoolique.

| | Lot 1 | | | | Lot 2 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | µ mol. | RT | RS | % | µ mol. | RT | RS | % |
| Extrait hydroalcoolique ..... | | 29 100 × $10^2$ | | | | 24 500 × $10^2$ | | |
| Fraction acide..... | | 2 930 × $10^2$ | | 10,1 | | 1 760 × $10^2$ | | 7,2 |
| Fraction basique ..... | | 2 020 × $10^2$ | | 6,9 | | 2 020 × $10^2$ | | 8,2 |
| Fraction neutre ..... | | 16 530 × $10^2$ | | 56,8 | | 11 700 × $10^2$ | | 47,8 |
| Acide citrique ..... | 39 | 32 390 | 831 | 1,1 | 41 | 17 220 | 420 | 0,7 |
| Acide succinique..... | 8 | 5 760 | 720 | 0,2 | 8 | 2 250 | 281 | 0,1 |
| Acide fumarique ..... | 5 | 1 010 | 202 | < 0,1 | 4 | 460 | 115 | < 0,1 |
| Acide malique ..... | 146 | 168 240 | 1 152 | 5,8 | 175 | 98 050 | 560 | 4,0 |
| Acide malonique..... | 11 | 5 600 | 509 | 0,2 | 11 | 2 220 | 202 | 0,1 |
| Acide glycérique ..... | 15 | 3 950 | 263 | 0,1 | 15 | 3 070 | 205 | 0,1 |

teneur soit nettement la plus forte. Le citrate apparaît aussi relativement bien marqué et la radioactivité est également détectée dans le succinate, le fumarate, le malonate et le glycérate. Les radioactivités spécifiques du fumarate, du succinate et du malate sont illustrées sur la figure 3.

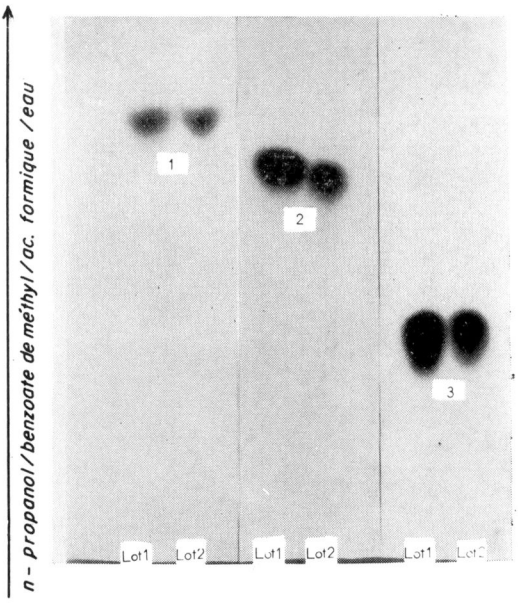



FIG. 3. — *Autoradiogramme d'acides organiques* (2,5μ moles d'acide) *extrait du ray-grass avant son enfouissement dans le sol*

1° Ac. fumarique.
2° Ac. succinique.
3° Ac. malique.

## II. — *Variations de la radioactivité au cours de la dégradation du ray-grass dans le sol*

Après 30 jours et *a fortiori* après 75 jours d'incubation, aussi bien dans le sol aéré que dans le sol saturé d'eau, le ray-grass apparaît décomposé, car il n'est plus perceptible à l'œil nu. En conséquence, il n'est possible de réaliser les extractions que sur le complexe sol-végétal décomposé. Aussi, pour pouvoir, au cours de la dégradation du ray-grass, suivre convenablement l'évolution de la radioactivité initialement présente dans le matériel végétal radioactif, nous avons, connaissant le poids de ray-grass frais (30 g) enfoui dans un poids donné de sol séché à l'air (1 200 g), ramené les radioactivités au gramme de sol sec à 110°C, et non plus, comme dans le tableau 1, au gramme de matière sèche de ray-grass. Ensuite, afin de pouvoir partir d'une même incorporation initiale de radioactivité dans les sols, aéré ou saturé d'eau, nous avons ramené à 10 000 impulsions par minute et par gramme de sol sec à 110°C, les radioactivités apportées à l'origine par le ray-grass lors de son enfouissement dans le sol (en réalité, ces radioactivités sont de 13 230 impulsions par minute (ipm) pour le sol aéré et de 11 140 ipm pour le sol saturé d'eau).

Par ailleurs, la radioactivité de l'extrait hydroalcoolique obtenu, après agitations successives du complexe sol-végétal, en présence des solutions suivantes : éthanol

80 p. 100, éthanol 60 p. 100, eau additionnée de résine cationique Dowex 50 forme $H^+$, n'est que très légèrement supérieure à la radioactivité de l'extrait hydroalcoolique obtenu en l'absence de résine, c'est-à-dire après agitation du même complexe sol-végétal, en présence d'éthanol 80 p. 100 puis 20 p. 100. En effet, pour le sol aéré, les radioactivités des extraits hydroalcooliques obtenus en présence ou en l'absence de résine sont respectivement de 423 et 355 ipm par gramme de sol sec à 110°C, après 30 jours d'incubation, 197 et 166 ipm après 75 jours d'incubation. Pour le sol saturé d'eau, ces radioactivités sont respectivement de 790 et 628 ipm après 30 jours d'incubation, 485 et 458 ipm après 75 jours d'incubation. La très faible radioactivité supplémentaire extraite par la résine correspond à des composés insolubles dans l'éthanol et dans l'eau, notamment les sels de calcium des acides organiques. Les radioactivités des extraits hydroalcooliques obtenus en présence ou en l'absence de résine étant du même ordre de grandeur, nous pouvons considérer que l'extrait hydroalcoolique sans résine contient la quasi-totalité des composés solubles radioactifs, la partie insoluble, non extraite par l'éthanol 80 p. 100 et l'éthanol 20 p. 100, renfermant la radioactivité des substances de l'humus.

a) *Dégradation du ray-grass dans le sol aéré.*

1. *Variations des radioactivités de l'extrait hydroalcoolique, de ses fractions acide, basique et neutre, des acides organiques.*

Trente jours après l'enfouissement du ray-grass dans le sol aéré, il est observé une forte baisse de la radioactivité de l'extrait hydroalcoolique (tabl. 2). A ce stade, la radioactivité de cet extrait ne représente plus en effet que 4,2 p. 100 de la radioactivité initialement apportée par le matériel végétal. Les radioactivités des fractions acide, basique et neutre, composant cet extrait hydroalcoolique, décroissent évidemment aussi très fortement, mais les pourcentages de diminution des radioactivités de ces fractions, rapportés respectivement à la radioactivité initiale de chaque fraction, ne sont pas équivalents. Alors que la radioactivité de la fraction neutre, la plus marquée à l'origine, ne représente plus, après 30 jours d'incubation, que 2,9 p. 100 et celle de la fraction acide 4,5 p. 100 de la radioactivité initiale, par contre, la radioactivité de la fraction basique, qui baisse proportionnellement moins que les radioactivités des fractions neutre et acide, représente encore à ce stade 20,7 p. 100 de la radioactivité initialement présente dans cette fraction. En ce qui concerne les acides organiques, si les teneurs en chacun de ces acides, constamment faibles et comprises entre un minimum de 0,5 et un maximum de 1,5 µmole par gramme de sol sec à 110°C, varient peu, il n'en est pas de même de leurs radioactivités qui décroissent fortement au cours de la dégradation du ray-grass dans le sol aéré. En particulier, les radioactivités élevées réparties à l'origine dans le malate et le citrate du ray-grass, ne peuvent plus être détectées dans ces deux acides, après 30 jours d'incubation.

Au cours de la seconde période 30-75 jours, la radioactivité de l'extrait hydroalcoolique décroît proportionnellement moins qu'elle ne le faisait au cours de la première période 0-30 jours. En effet, après 75 jours d'incubation, la radioactivité de cet extrait représente encore 46,6 p. 100 de la radioactivité qui y demeurait présente, après 30 jours. La radioactivité de la fraction acide varie comme celle de l'extrait hydroalcoolique. Par contre, au cours de cette seconde période, la radio-

activité de la fraction basique diminue proportionnellement plus et celle de la fraction neutre proportionnellement moins qu'elles ne le faisaient respectivement au cours des 30 premiers jours d'incubation.

2. *Intégration de la radioactivité dans les composés de l'humus. Variations.*

Trente jours après l'enfouissement du ray-grass dans le sol aéré, une partie (7,5 p. 100) de la radioactivité apportée initialement par les composés solubles du matériel végétal se trouve incorporée dans les substances de l'humus. Le $^{14}C$ apparaît distribué plus fortement dans les acides fulviques, l'α-humus, l'humine soluble et le β-humus. La radioactivité de l'humine soluble et surtout celle des acides hymatomélaniques sont au contraire plus faibles.

TABLEAU 2

*Dégradation, dans le sol aéré, du ray-grass marqué au $^{14}C$ : distribution de la radioactivité dans l'extrait hydroalcoolique, ses fractions acide, basique et neutre, les acides organiques et les différentes fractions de l'humus*

*Expression des résultats.* Les radioactivités totales (RT) sont exprimées en impulsions par minute (ipm) par gramme de sol sec à 110° C.

| | Nombre de jours d'incubation | | |
|---|---|---|---|
| | 0 | 30 | 75 |
| | RT | RT | RT |
| Extrait hydroalcoolique | 10 000 | 423 | 197 |
| Fraction acide | 1 005 | 45 | 23 |
| Fraction basique | 695 | 144 | 15 |
| Fraction neutre | 5 684 | 166 | 121 |
| Acide citrique | 111 | N. D. | N. D. |
| Acide succinique | 20 | 2 | N. D. |
| Acide fumarique | 4 | 2 | N. D. |
| Acide malique | 578 | N. D. | N. D. |
| Acide malonique | 19 | 2 | N. D. |
| Partie humique | | 748 | 513 |
| Acides fulviques | | 159 | 121 |
| β-humus | | 128 | 23 |
| Ac. hymatomélaniques | | 53 | 45 |
| α-humus | | 159 | 151 |
| Humine soluble | | 151 | 113 |
| Humine insoluble | | 98 | 60 |

N. D. = Non détectable.

Au cours de la période 30-75 jours qui suit l'enfouissement du ray-grass dans le sol aéré, la radioactivité retrouvée dans la partie humique décroît, mais légèrement. Cette diminution de la radioactivité ne correspond pas à une baisse de toutes les radioactivités des différentes substances de l'humus, mais elle résulte seulement d'une diminution des radioactivités de quatre fractions : acides fulviques, humines soluble ou insoluble et surtout β-humus, les radioactivités des deux autres fractions :

acides hymatomélaniques et α-humus, demeurant pendant cette période sensiblement constantes.

Après 75 jours d'incubation du ray-grass radioactif dans le sol aéré, la distribution de la radioactivité dans les fractions de l'humus devient la suivante : l'α-humus, les acides fulviques et l'humine soluble sont les fractions les plus marquées. Quant aux trois autres fractions : β-humus, acides hymatomélaniques et humine insoluble, elles apparaissent moins radioactives.

b) *Dégradation du ray-grass dans le sol saturé d'eau.*

1. *Variations des radioactivités de l'extrait hydroalcoolique, de ses fractions acide, basique et neutre, des acides organiques.*

Trente jours après l'enfouissement du ray-grass dans le sol saturé d'eau, la radioactivité de l'extrait hydroalcoolique a aussi très fortement baissé (tabl. 3), mais dans une proportion légèrement moindre que dans le sol aéré, car, à ce stade, elle représente encore 7,9 p. 100 de la radioactivité initialement apportée par les composés solubles du ray-grass, alors qu'elle n'est plus que de 4,2 p. 100 dans le sol aéré. Cette baisse de la radioactivité totale des substances solubles traduit éga-

TABLEAU 3

*Dégradation, dans le sol saturé d'eau, du ray-grass marqué au $^{14}C$ : distribution de la radioactivité dans l'extrait hydroalcoolique, ses fractions acide, basique et neutre, les acides organiques et les différentes fractions de l'humus*

*Expression des résultats.* Les radioactivités totales (RT) sont exprimées en impulsions par minute (ipm) par gramme de sol sec à 110° C.

| | Nombre de jours d'incubation | | |
|---|---|---|---|
| | 0 | 30 | 75 |
| | RT | RT | RT |
| Extrait hydroalcoolique | 10 000 | 790 | 485 |
| Fraction acide | 718 | 135 | 36 |
| Fraction basique | 826 | 81 | 63 |
| Fraction neutre | 4 776 | 368 | 251 |
| Acide citrique | 70 | N. D. | N. D. |
| Acide succinique | 9 | 10 | N. D. |
| Acide fumarique | 2 | 1 | N. D. |
| Acide malique | 400 | N. D. | N. D. |
| Acide malonique | 9 | 2 | N. D. |
| Partie humique | | 1 151 | 710 |
| Acides fulviques | | 368 | 126 |
| β-humus | | 135 | 18 |
| Ac. hymatomélaniques | | 180 | 72 |
| α-humus | | 270 | 233 |
| Humine soluble | | 117 | 171 |
| Humine insoluble | | 81 | 90 |

N. D. Non détectable.

lement comme dans le sol aéré, une diminution des radioactivités des trois fractions acide, basique et neutre, mais cette diminution se fait de manière différente de celle observée dans le sol aéré. Par rapport aux radioactivités initiales respectives de chaque fraction, la radioactivité de la fraction neutre, la plus marquée à l'origine, et celle de la fraction basique diminuent davantage que celle de la fraction acide. Ainsi, dans le sol saturé comme dans le sol aéré, la radioactivité de la fraction neutre diminue très fortement mais, alors que dans le sol aéré, la radioactivité de la fraction acide baisse proportionnellement plus que celle de la fraction basique, c'est l'inverse qui est observé dans le sol saturé d'eau. D'autre part, si les conditions d'anaérobiose, provoquées par l'inondation se manifestent par le maintien, après 30 jours d'incubation, de la radioactivité dans le succinate, elles n'empêchent cependant pas la dégradation totale du malate et du citrate radioactifs apportés initialement par le ray-grass.

Au cours de la seconde période 30-75 jours, la radioactivité de l'extrait hydroalcoolique décroît, comme dans le sol aéré, proportionnellement moins qu'elle ne le faisait précédemment, au cours des 30 premiers jours d'incubation. En effet, 75 jours après l'enfouissement du ray-grass dans le sol saturé d'eau, la radioactivité retrouvée dans l'extrait hydroalcoolique représente encore 61,4 p. 100 de celle qui y était détectable après 30 jours. Au cours de cette seconde période d'incubation, les radioactivités des fractions neutre et basique diminuent dans des proportions plus faibles, mais la radioactivité de la fraction acide baisse dans une proportion plus élevée. Après 75 jours d'incubation, la radioactivité, comme dans le sol aéré, n'est plus détectable dans les acides organiques.

### 2. *Intégration de la radioactivité dans les composés de l'humus. Variations.*

Dans le sol saturé d'eau (tabl. 3), la radioactivité incorporée dans la partie humique, après 30 jours d'incubation, est plus élevée que celle retrouvée au même stade dans le sol aéré. Elle représente en effet dans le sol saturé 11,5 p. 100 de la radioactivité initialement apportée par le ray-grass, alors qu'elle n'est que de 7,5 p. 100 dans le sol aéré. Cette augmentation plus forte, dans le sol saturé d'eau par rapport au sol aéré, des radioactivités distribuées dans les substances de l'humus, provient d'une intégration plus importante du $^{14}C$ dans les acides fulviques et hymatomélaniques, ainsi que dans l'α-humus. Par contre, les radioactivités distribuées dans les humines, solubles ou insolubles, diminuent sous l'effet de l'inondation et la radioactivité répartie dans la fraction β-humus ne semble pas influencée par les conditions d'aérobiose ou d'anaérobiose du sol.

Au cours de la période 30-75 jours qui suit l'enfouissement du ray-grass dans le sol saturé, les radioactivités des acides fulviques et hymatomélaniques ainsi que du β-humus baissent nettement, celle de l'α-humus décroît plus faiblement alors que dans le sol aéré, seules diminuent les radioactivités des acides fulviques et du β-humus. Par ailleurs, dans le sol saturé, au cours de cette seconde période, les radioactivités des humines, solubles ou insolubles, tendent à augmenter alors que dans le sol aéré, elles tendent au contraire à baisser.

Après 75 jours d'incubation, la distribution de la radioactivité dans l'humus du sol saturé se rapproche de celle observée à la même date dans le sol aéré : l'α-humus

devient la fraction la plus radioactive, l'humine soluble et les acides fulviques apparaissent également bien marqués, mais les radioactivités détectées dans l'humine insoluble, les acides hymatomélaniques et surtout dans le β-humus sont beaucoup plus faibles.

## CONCLUSIONS

Les résultats du présent travail montrent que, au point de vue quantitatif, la dégradation de jeunes plantes de ray-grass enfouies dans un sol riche en matière organique, est très rapide et très forte, que ce sol reçoive peu d'eau (sol aéré) ou beaucoup d'eau (sol saturé). Toutefois, la dégradation du matériel végétal apparaît encore plus grande dans le sol aéré que dans le sol saturé d'eau.

Trente jours après l'enfouissement du ray-grass dans le sol, la totalité de la radioactivité retrouvée dans le complexe sol-végétal et distribuée pour 1/3 environ dans les composés solubles dans l'éthanol dilué, pour 2/3 dans les substances insolubles dans l'éthanol dilué (humus), ne représente plus dans le sol aéré et dans le sol saturé, que respectivement 11,7 et 19,4 p. 100 de la radioactivité initialement apportée par le ray-grass.

La forte radioactivité perdue par le matériel végétal au cours de sa dégradation (respectivement 88,3 et 80,6 p. 100 pour le sol aéré et pour le sol saturé) et qui ne se retrouve, après un mois d'incubation ni dans l'extrait hydroalcoolique, ni dans les fractions de l'humus, a dû être intégrée soit dans des composés volatils, par exemple formiate, acétate, propionate, non déterminés par les techniques d'analyses utilisées, soit, plus vraisemblablement, en majeure partie dégagée sous forme de $^{14}CO_2$.

Les processus qui règlent la décomposition de la matière organique se déroulent ensuite beaucoup plus lentement puisque, après 75 jours d'incubation, les radioactivités totales retrouvées dans le sol aéré ou dans le sol saturé, représentent encore respectivement 7,1 et 12,0 p. 100 de la radioactivité initialement apportée par le ray-grass, alors que ces pourcentages de radioactivités s'élevaient respectivement à 11,7 et 19,4 p. 100 après 30 jours d'incubation.

Par ailleurs, la diminution de la radioactivité de l'humus, observée au cours de la période 30-75 jours qui suit l'enfouissement du ray-grass dans le sol aéré ou dans le sol saturé montre que les substances de l'humus font l'objet, à un stade plus tardif, d'une réutilisation partielle.

Si, au point de vue quantitatif, les dégradations du ray-grass dans le sol aéré et dans le sol saturé atteignent, après 30 jours d'incubation, des valeurs assez voisines, il n'en est pas de même au point de vue qualitatif, la décomposition du ray-grass semblant s'effectuer de manière différente dans le sol aéré et dans le sol saturé.

Dans le sol aéré, au cours des 30 premiers jours d'incubation, la diminution plus forte des radioactivités des fractions neutre et acide, accompagnée d'une baisse proportionnellement plus faible de la radioactivité de la fraction basique, signifie que le $^{14}C$ des fractions neutre et acide du matériel végétal est davantage converti en composés volatils ou gazeux que ne l'est le $^{14}C$ de la fraction basique. Le fait que la radioactivité de la fraction basique diminue proportionnellement moins n'implique pas que les acides aminés libres du ray-grass qui composent à l'origine cette fraction soient plus résistants à la dégradation. En effet, il n'est pas exclu que les acides

aminés libres du matériel végétal aient été convertis en acides aminés microbiens et que le $^{14}C$ détecté dans la fraction basique de l'extrait hydroalcoolique du complexe sol-végétal décomposé soit, de ce fait, le $^{14}C$ incorporé dans ces acides aminés libres microbiens. Au cours des expériences que nous avons réalisées, ce point n'a pas été éclairci, mais cette hypothèse nous paraît assez plausible d'autant plus qu'elle repose sur l'existence dans le sol aéré, d'une vie microbienne active, la synthèse par les microorganismes d'acides aminés libres allant de pair avec une bonne utilisation des composés acides et neutres (sucres notamment).

L'existence d'une vie microbienne aussi active semble faire défaut dans le sol saturé où il est observé, contrairement à l'évolution de la radioactivité dans le sol aéré, une diminution moindre des radioactivités des fractions neutre et acide, mais, par contre une baisse plus élevée de la radioactivité de la fraction basique.

Les différences qualitatives qui semblent exister entre les décompositions du ray-grass dans le sol aéré et dans le sol saturé, apparaissent également à l'examen des variations des radioactivités des acides organiques. Si, dans les deux sols, les acides malique et citrique qui peuvent se décarboxyler facilement, sont dégradés totalement, puisque leurs radioactivités, après 30 jours d'incubation, ne sont plus détectables, par contre, le succinate $^{14}C$, apporté initialement par le ray-grass, demeure plus longtemps et plus fortement radioactif dans le sol saturé que dans le sol aéré : un tel fait traduit un manque d'aération du sol saturé puisque l'acide succinique est connu chez les végétaux pour s'accumuler dans des conditions de milieu réducteur.

Enfin, les distributions différentes du $^{14}C$ dans les substances humiques, après 30 jours d'incubation, montrent aussi que la nature des processus qui interviennent dans l'humification du matériel végétal, n'est pas la même dans le sol aéré et dans le sol saturé. Cependant, le déroulement différent de l'humification dans le sol aéré et dans le sol saturé, conduit plus tardivement au même type d'équilibre entre les diverses substances de l'humus puisque, 75 jours après l'enfouissement du ray-grass, il est observé que les répartitions du $^{14}C$ dans les composés humiques du sol aéré et du sol saturé deviennent très voisines.

*Reçu pour publication en mai 1970.*

## SUMMARY


### COMPARISON OF THE DECOMPOSITION OF RAY GRASS SEEDLINGS LABELLED WITH $^{14}C$ IN AERATED AND IN WATER-SATURATED SOILS

One-month-old ray grass plants were submitted to photosynthesis for three hours in the presence of $^{14}CO_2$ under a 20 000 lux light at 22-23°C. After $^{14}CO_2$ fixation they were cut into small pieces which were then mixed with a soil of pH = 7.2, rich in organic matter, and contained in dessiccators (30 g of ray grass to 1 200 g of air-dried soil). The soil in two of these dessiccators was watered until it reached a moisture content equal to 25 p. 100 of its maximum water-holding capacity (called aerated soil). The soil in two other dessiccators was watered until it reached a humidity equal to 100 p. 100 of its maximum water-holding capacity (called water-saturated soil). The dessiccators were then kept at a temperature of 20°C, with the humidity maintained at a constant level. Thirty to seventy-five days after the incorporation of the ray grass the radioactivity was estimated, for the one part, in the hydroalcoholic extract obtained from the decomposed vegetation/soil complex, in the acid, basic, neutral and organic acid fractions and, for the other, in the different humus fractions.

The following conclusions can be postulated :

In this experimentally prepared soil the ray grass decays very rapidly at 20°C, but decom-

poses in the aerated soil even sooner than in the saturated soil. After 30 days of incubation a pronounced reduction is observed in the radioactivity that was originally present in the soluble components of the plant material (sugars, free amino-acids, organic acids, chiefly malate and citrate). The radioactive compounds not rediscovered in the decomposed soil/plant mixture had apparently been converted into volatile or gaseous compounds ($^{14}CO_2$). The radioactive substances remaining in the soil after 30 days of incubation subsequently decayed at a slower rate.

The variations in the radioactivity of the hydroalcoholic extract and its acid, basic and neutral fractions depend on whether the aerated soil has been kept aerated or saturated. In the aerated soil the amount of radioactivity in the neutral and acid fractions declined rapidly after 30 days of incubation, but the radioactivity of the basic fraction diminished proportionately less. Conversely, in the saturated soil, it was the radioactivity of the basic fraction that declined most rapidly, while the radioactivity of the neutral and acid fractions diminished proportionately less quickly.

A small part of the radioactivity originally present in the soluble compounds of the ray grass was found again, after 30 days of incubation, in the humus fractions, which were, at this stage, more marked in the saturated than in the aerated soil. These humic compounds subsequently changed because, under both treatments, the total radioactivity in the soil diminished, though more gradually. Humification, which seems to occur differently in the soil, leads in the long run, whether in the aerated or the saturated soil, to the same type of humic fraction labelling : predominant radioactivity of the α-humus, relatively pronounced labelling of the fulvic acids and hydrolysable humin, and weaker radioactivity in the non-hydrolysable humin, in the hymatomelanic acids and, above all, in the β-humus fraction.

These facts suggest that, in this experimental soil, the quantity of water added to the soil exercised a stronger influence on the qualitative aspect of the decomposition of ray grass in the soil than on its quantitative aspect.

## ZUSAMMENFASSUNG


### VERGLEICH DER DEGRADIERUNG EINES JUNGEN, MIT $^{14}C$ MARKIERTEN RAYGRASES, IN EINEM GELÜFTETEN UND IN EINEM MIT WASSER GESÄTTIGTEN BODEN

Junge, ein Monat alte Raygraspflanzen werden während 3 h einer Photosynthese mittels Beleuchtung von 20 000 Lux bei 22-23°C und in Gegenwart von $^{14}CO_2$ ausgesetzt. Nach Fixierung des $^{14}CO_2$, werden sie in kleine Stücke geschnitten und mit einer reichlich mit organischem Material versehenen Bodenprobe von pH = 7,2 gemischt, die sich in Dessiccatoren (30 g Raygras für 1 200 g luftgetrockneter Erde) befindet. Die Erde von zwei dieser Dessiccatoren wird begossen bis eine Feuchtigkeit von 25 p. 100 der maximalen Wasserzurückhaltenkapazität erreicht wird (« gelüftete Erde » genannt). — Die Erde von zwei anderen Dessiccatoren wird bis zu einer Feuchtigkeit gleich 100 p. 100 des maximalen Wasserzurückhaltenkapazität (« gesättigte Erde » genannt) begossen. — Sämtliche Dessiccatoren werden dann auf 20°C bei unveränderter Feuchtigkeit gebracht. — 30 und 75 Tage nach der Eingrabung des Raygrases wird die Radioaktivität einerseits in dem aus dem zerfallenen pflanzlichen Bodenkomplex erlangten Alkoholwasserstoffextrakte, in ihren saueren, basischen, neutralen Bruchteilen, sowie in den organischen Säuren, anderseits in verschiedenen Teilen des Humus untersucht.

Die nachstehenden Schlussfolgerungen konnen gezogen werden :

In diesem Versuchsboden zersetzt sich das Raygras bei 20°C sehr schnell, aber noch schneller in dem gelüfteten Boden als in dem gesättigten Boden. Nach 30 Tagen Inkubationszeit wird in der Tat eine starke Herabsetzung der Radioaktivität beobachtet, die am Anfang in den löslichen Verbindungen des pflanzlichen Materials vorherrschte (Zucker, freie Aminosäuren, organische Säuren, hauptsächlich apfelsaures und zitronensaures Salz). Die in dem zerfallenen Komplex Boden-Pflanze nicht wiedergefundenen radioaktiven Verbindungen wurden wahrscheinlich in flüchtige oder gasförmige ($^{14}CO_2$) Verbindungen umgewandelt. Die im Boden nach 30-tägiger Inkubation wiedergefundenen radioaktiven Substanzen werden anschliessend langsamer abgebaut.

Die Änderungen der Radioaktivitäten des Alkoholwasserstoffextraktes und ihrer sauren, basischen, neutralen Bruchteile unterscheiden sich je nach dem gelüfteten Zustand des Bodens oder dem Sättigungszustand. In dem gelüfteten Boden sinken die Radioaktivitäten der neutralen und sauren Anteile sehr stark nach 30-tägiger Inkubation. Die Radioaktivität des basischen

Anteils jedoch nimmt verhältnismässig weniger ab. Im gesättigten Boden dagegen nimmt die Radioaktivität des basischen Anteils am stärksten, während die Radioaktivitäten der neutralen und sauren Anteile im Verhältnis weniger stark abnehmen.

Eine schwache Dosis von Radioaktivität, die anfänglich in den lösbaren Verbindungen des Raygrases vorhanden war, wird nach 30-tägiger Inkubation in jenen Anteilen des Humus wiedergefunden, die, in diesem Stadium, mehr in dem gesättigten Boden markiert sind als in dem gelüfteten Boden. Diese humushaltigen Verbindungen werden anschliessend umgearbeitet, denn die totale in dem Humus eingearbeitete Radioaktivität nimmt später für die beiden Behandlungsarten ab. — Die Humusbildung, die im Boden auf verschiedenen Weise zu entstehen scheint, führt mit der Zeit in dem gelüfteten und in dem gesättigten Boden zu demselben Markierungstypus der humushaltigen Anteile : vorherrschende Radioaktivität des α-Humus, ziemlich starke Markierung der Fulvosäuren und der hydrolysierbaren Huminsäure, schwächere Radioaktivität der nicht hydrolysierbaren Huminsäure, der hymatomelanischen Säuren und insbesondere des β-Humusanteils.

Diese Tatsachen lassen vermuten, dass in diesem experimentalen Boden die hinzugefügte Wassermenge mehr die qualitative Natur des Raygraszersetzung im Boden beeinflusst als deren quantitative Natur.

## РЕЗЮМЕ

*Сравнительная деградация молодого рай-грасса меченного $C^{14}$ в аэрированной и влаго-насыщенной почвах.*

О. П. Вималь, Е. Жоливэ.

Молодые растения рай-грасса, в возрасте 1-го месяца, экспонировались в течении 3-х часов в атмосфере $C^{14}$ $O_2$ при освещении в 20 000 люкс. и температуре 22-23°. После фиксации, растения разрезались на фрагменты, которые затем смешивались с почвой (pH = 7,2), богатой органическим веществом и сохранявшейся в эксикаторах (30 гр. рай-грасса на 1 200 гр. воздушно-сухой почвы). Почва двух первых эксикаторов поливалась до достижения 25 % полевой влагоемкости (аэрированная почва), в то время как почва двух других поддерживалась на уровне 100 % полевой влагоемкости (насыщенная почва). Затем эксикаторы ставились в условия температуры 20 °C и постоянной влажности. 30 и 75 дней после заделки рай-грасса измерялась радиоактивность водно-спиртового экстракта разложившегося комплекса почва — растение, его кислотных, щелочных и нейтральных фракций, органических кислот и различных гумусовых фракций.

Из опыта этого можно вывести следующие заключения :

— Разложение рай-грасса протекает очень быстро при температуре в 20 °C и быстрее в аэрированной почве, чем в насыщенной. Действительно, после 30-ти дневной инкубации наблюдалось быстрое уменьшение начальной радиоактивности растворимых соединений растительного материала (сахара, свободные аминокислоты, органические кислоты и главным образам соединения яблочной и лимонной кислот). Радиоактивные соединения исчезнувшие из разложившегося комплекса почва — растение превратились по всей вероятности в летучие или газообразные соединения ($C^{14}O_2$). Что-же касается радиоактивных веществ, снова найденных в почве после 30-ти дневной инкубации, они деградируются гораздо медленнее.

— Изменения радиоактивности водно-спиртовой вытяжки и ее кислотных, щелочных и нейтральных фракций, разнятся в зависимости

от степени аэрации почвы. В почве аэрированной радиоактивность нейтральной и кислотной фракций резко уменьшается после 30-ти дневной инкубации, в то время как радиоактивность щелочной фракции, ослабевает менее. И напротив радиоактивность щелочной фракции уменьшается наиболее в насыщенной почве, в то время как радиоактивность кислотной и нейтральной фракций уменьшается замедленным темпом.

— Меньшая часть начальной радиоактивности растворимых соединений рай-грасса найдена была после 30-ти дневной инкубации в гумусовых фракциях почвы, которые на этой стадии опыта были более радио-

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BINGEMAN C. W., VARNER J. E., MARTIN W. P., 1956. Use of carbon 14 to determine the effect of added organic matter on the biological decomposition of peat soil. *U. S. Atomic Energy Comm.*, **TID-7512**, 381-386.

BOVÉ J., RAVEUX R., 1957. La séparation et la détermination des acides carboxyliques de $C_1$ à $C_6$ par chromatographie de partage sur colonne de silice. II. Nouvelle technique proposée. *Bull. Soc. Chim. Fr.*, 376-381.

BREMNER J. M., 1967. Nitrogenous compounds. In *Soil Biochemistry*. Éd. A. D. Mac LAREN et G. H. PETERSON 1967, M. DEKKER, Inc., New York, 19-66.

BROADBENT F. E., 1956. Tracer investigations of plant residue decomposition in soils. *U. S. Atomic Energy Comm.*, **TID-7512**, 371-379.

BRÜCKERT S., 1966. Répartition des acides hydrosolubles dans quelques profils de sols forestiers. *C. R. Acad. Sci. Paris*, D, **263**, 1 572-1 575.

CHAMINADE R., 1960. Expérimentation en petits vases de végétation. Type d'essais pour tester l'efficacité des engrais humiques. *Ann. agron*, (2), 121-133.

CHAMINADE R., 1964. Étude des carences minérales du sol par l'expérimentation en petits vases de végétation. *Sci. sol*, 157-168.

CHEFTEL R.-I., MUNIER R., MACHEBŒUF M., 1952. Microchromatographie sur papier des acides aliphatiques hydrosolubles et non volatils. II. Utilisation d'une phase solvante alcaline puis d'une phase acide pour la microchromatographie à deux dimensions. *Bull. Soc. Chim. biol.*, **34**, 380-387.

COSTES C., 1963. Incorporation de $^{14}CO_2$, d'acétate 2-$^{14}$C et de mévalonate 2-$^{14}$C dans les caroténoïdes de la feuille adulte de tomate. *Ann. Physiol. vég.*, **5**, 115-140.

COSTES C., 1965. *Recherches sur la biosynthèse et le métabolisme des caroténoïdes dans les feuilles.* Thèse Doctorat État Sci. Nat., Orsay (France), 157 p.

GOSWAMI N. N., DATTA N. P., 1961. Tracer studies on the decomposition of $C^{14}$ and $P^{32}$ tagged organic matter and nutrient availability relationships in soils. *J. ind. Soc. Soil Sci.*, **9**, 269-279.

GUPTA U. C., 1967. Carbohydrates. In *Soil Biochemistry*. Éd. A. D. Mc LAREN et G. H. PETERSON, 1967, M. DEKKER, Inc. New York, 91-118.

JENKINSON D. S., 1965. Studies on the decomposition of plant material in soil. I. Losses of carbon from $C^{14}$ labelled rye grass incubated with soil in the field. *J. Soil Sci.*, **16**, 104-115.

MAYAUDON J., SIMONART P., 1958. Étude de la décomposition de la matière organique dans le sol au moyen de carbone radioactif. II. Décomposition du glucose radioactif dans le sol. A. Répartition de la radioactivité dans les fractions humiques du sol. *Plant and Soil*, **9**, 376-380.

MAYAUDON J., SIMONART P., 1959 *a*. Étude de la décomposition de la matière organique dans le sol au moyen de carbone radioactif. III. Décomposition des substances solubles dialysables, des protéines et des hémicelluloses. *Plant and Soil*, **11**, 170-175.

MAYAUDON J., SIMONART P., 1959 *b*. Étude de la décomposition de la matière organique dans le sol au moyen de carbone radioactif. V. Décomposition de cellulose et de lignine. *Plant and Soil*, **11**, 181-192.

NORMAN A. G., 1930. The biological decomposition of plant materials. Part III. Physiological studies on some cellulose decomposing fungi. *Ann. appl. Biol.*, **17**, 575-612.

PASKOVA J., MUNK V., 1960. A combined detecting reagent for the identification of organic acids on paper chromatograms. *J. Chromat.*, **4**, 241-243.

SIMONART P., MAYAUDON J., 1958 *a*. Étude de la décomposition de la matière organique dans le sol au moyen de carbone radioactif. I. Cinétique de l'oxydation en $CO_2$ de divers substrats radioactifs. *Plant and Soil*, **9**, 367-375.

SIMONART P., MAYAUDON J., 1958 *b*. Étude de la décomposition de la matière organique dans le sol au moyen de carbone radioactif. II. Décomposition du glucose radioactif dans le sol. B. Répartition de la radioactivité dans l'α-humus. *Plant and Soil*, **9**, 381-384.

SIMONART P., MAYAUDON J., BATISTIC L., 1959. Étude de la décomposition de la matière organique dans le sol au moyen de carbone radioactif. IV. Décomposition des pigments foliaires. *Plant and Soil*, **11**, 176-180.

SÖRENSEN H., 1963. Studies on the decomposition of $C^{14}$-labeled barley straw in soil. *Soil Sci.*, **95**, 45-51.

STEVENSON F. J., 1967. Organic acids in soil. In *Soil Biochemistry*. Éd. A. D. MC LAREN et G. H. PETERSON, 1967. M. DEKKER, Inc. New York, 119-146.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (3), 305-314.

# LA BIOSYNTHÈSE DES PHOSPHATES CONDENSÉS PAR LA MICROFLORE DU SOL ET SON RÔLE DANS LA NUTRITION DES VÉGÉTAUX

A. TARDIEUX-ROCHE et P. TARDIEUX

*Institut Pasteur*
*Service de Microbiologie du Sol*
*25, rue du Docteur Roux*
*75 – Paris 15e*

## RÉSUMÉ

*Hypochoeris glabra* L. a été cultivé aseptiquement sur sable pendant un mois avec un apport étroitement limité de phosphore sous quatre formes différant par leur capacité d'approvisionner la solution en ions phosphoriques dans ce délai : orthophosphate et métaphosphate de potassium, apatite, cellules microbiennes tuées après avoir été cultivées sur apatite et ainsi enrichies en polyphosphate. Le développement des plantules a été observé, leur poids sec et leur teneur en phosphore ont été mesurés après un mois.

Il n'y a pas de différence significative dans l'alimentation de la plante avec métaphosphate ou orthophosphate. L'utilisation de l'apatite par la plante seule est négligeable. Le phosphore des cellules microbiennes est significativement plus disponible mais ne peut être utilisé en totalité dans les conditions de l'expérience. Les cellules microbiennes sont donc certainement capables de réaliser un transfert de phosphore du minerai à la plante, dans la mesure où elles utilisent le minerai pour leur nutrition phosphorée aussi bien que les phosphates solubles ce dont la plante est incapable.

Il a été montré antérieurement que certaines bactéries du sol capables d'assimiler le phosphore à partir de minerais très peu solubles de phosphates naturels en immobilisaient une part sous forme de phosphates condensés (TARDIEUX-ROCHE, 1966). On sait aussi que l'industrie des fertilisants a, ces dernières années, concentré ses efforts sur la production de produits à haute teneur en phosphore. Les phosphates condensés qui répondent à cette exigence commencent à être appliqués sur une assez grande échelle (TERMAN et SEATZ, 1956 ; CARPENTIER, 1966). Il était tentant de faire un rapprochement entre cette tendance de l'industrie des engrais et la découverte de phosphates condensés chez de nombreux microorganismes, puis de rechercher si la biosynthèse de produits de ce type ne pouvait pas jouer un rôle appréciable dans l'alimentation phosphorée des plantes. D'autre part, on connaît très mal l'évolution des phosphates naturels dans les sols où ils sont introduits, surtout dans les sols alcalins et les transformations qu'ils subissent avant d'être assimilés par les plantes.

L'immobilisation par la microflore est certainement l'un des mécanismes qui aboutit à la libération de formes assimilables parmi lesquelles la forme polyphosphorique ne doit pas être négligée. Nous nous sommes proposés d'en apprécier l'importance.

L'objet de l'expérimentation rapportée est ainsi de comparer la valeur des différentes formes d'alimentation phosphorée pour une plante test pendant les semaines qui suivent la germination.

## CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

Les plantes sont cultivées aseptiquement sur sable alimenté par une solution minérale stérile, à partir de graines désinfectées. Le phosphore est fourni sous l'une des formes suivantes :

1° apatite de Gafsa,

2° cellules microbiennes tuées par dessiccation à l'acétone après culture sur un milieu synthétique contenant de l'apatite de Gafsa comme seule source de phosphore,

3° orthophosphate de potassium,

4° métaphosphate de potassium obtenu par synthèse chimique industrielle (Scottish Agricultural Industries Ltd).

### *Choix de l'espèce végétale*

Plusieurs espèces végétales ont été soumises à des essais préliminaires en vue de déterminer la rapidité de leur réponse à une privation de phosphore. Pour moutarde, asperge, concombre, millet, la carence ne peut être observée pendant le premier mois de croissance, si l'on ne prend pas de dispositions rigoureuses pour éliminer toute trace de phosphore de la solution nutritive et du sable. Ces traces de phosphore s'ajoutant aux réserves de la graine suffisent à supporter pendant le premier mois un développement presque équivalent des plantes alimentées par des solutions nutritives privées ou non de phosphore. Au cours du deuxième mois la privation se traduit principalement par un retard de croissance observé de la façon la plus nette sur moutarde. Des essais d'excision partielle des cotylédons ont donné des résultats inconstants. Par contre, lorsqu'on alimente par une solution sans phosphore des espèces végétales à petites graines dont les réserves sont rapidement épuisées, telles que *Hypochoeris glabra* L., *Vulpia myuros* L. et *Cryptostemma calendula* L., déjà utilisées pour des fins analogues (Asher et Loneragan, 1967), il n'est pas nécessaire de purifier spécialement les sels constitutifs du milieu pour obtenir un arrêt de la croissance entre le dixième et le vingtième jour. Il suffit que le sable ait été soigneusement lavé à l'acide. En raison de la facilité de désinfection des graines de *Hypochoeris*, nous avons réalisé sur cette plante toute l'expérimentation.

### *Préparation des cellules bactériennes*

On récolte des cellules de *Agrobacterium radiobacter*, souche $P_{16}$, cultivée sur milieu synthétique où C et N sont fournis par du glucose et de l'asparagine et P exclusivement par de l'apatite de Gafsa. Il a été montré antérieurement que ces conditions de culture conviennent particulièrement bien à l'accumulation de P par cette souche sous forme de phosphates inorganiques dont une proportion élevée de phosphates condensés. Les cellules sont séparées des cristaux d'apatite, puis de la solution par centrifugation fractionnée. Elles sont ensuite lavées puis traitées par l'acétone à froid et séchées sous vide jusqu'à élimination complète de l'acétone. Les résultats du fractionnement des composés phosphorés de ces cellules ont été publiés antérieurement (Tardieux-Roche, 1966). Ils montrent que l'acido-soluble est formé à 85 p. 100 par du phosphore inorganique et l'acido-insoluble à 50 p. 100. La proportion de phosphates condensés ne peut être évaluée que par défaut, une partie de ces composés s'hydrolysant au cours des fractionnements. Les valeurs obtenues varient donc d'un lot à l'autre. La proportion la plus haute que nous ayions trouvée, s'élevait à 19,1 p. 100 du phosphore total.

*Solubilité et stabilité des polyphosphates industriels*

Plusieurs échantillons de « métaphosphates » de potassium, calcium et ammonium, préparés par l'industrie à usage de fertilisants ont été éprouvés pendant deux mois afin de déterminer leur vitesse de dissolution et d'hydrolyse lorsqu'ils sont introduits en eau distillée à la dose de 1 gramme par litre et maintenus à 28°C sans agitation. Ces concentrations sont très inférieures aux limites de solubilité. Les résultats de ces épreuves sont représentés dans le tableau 1. L'échantillon C de « métaphosphate » de potassium qui se dissout le plus lentement et dont une faible proportion s'hydrolyse en orthophosphate est celui qui se prête le mieux à une comparaison avec le phosphore des cellules microbiennes dans une épreuve d'absorption durant plusieurs semaines. Il a seul été utilisé dans ce but au cours de l'expérimentation.

*Préparation et contrôle des semences*

Les graines d'*Hypochoeris glabra* L. séparées de leurs aigrettes sont immergées successivement dans des bains de : teepol, 5 minutes ; alcool à 96°, 5 minutes et hypochlorite de sodium, 2 minutes ; puis lavées à l'eau distillée stérile. Elles sont ensuite mises en germination. Deux à trois jours après la germination lorsque la stérilité est éprouvée, elles sont mises en culture.

*Dispositif de mise en culture des plantules*

Chaque plantule est cultivée sur 200 grammes environ de sable grossier contenu dans un entonnoir filtrant, cylindrique (type filtre à mercure) de porosité 2, de 20 cm de hauteur et de 3 cm de diamètre. Le sable a été lavé à l'acide et a subi une première stérilisation à part à 130°C. Les tubes sont groupés par série de 5, réunis à un même flacon de Wolff de 2 litres par l'intermédiaire d'une tubulure de distribution. Les raccords sont en caoutchouc souple stérilisable à l'autoclave. Chaque tubulure se trouve, en outre, raccordée par l'intermédiaire d'une plaque poreuse (filtre à gaz) à un dispositif de prélèvement aseptique. Dans chaque flacon de Wolff, on introduit 1,9 litre d'une solution de Hoaglang modifiée, sans P, de composition suivante : $KNO_3$ 0,45 g ; $Ca(NO_3)_2$ 0,75 g ; $MgSO_4$, 7 $H_2O$ 0,26 g ; oligo-éléments 10 ml ; eau distillée q.s.p. 1 000 ml ; le pH est ajusté à 6,0. Les oligo-éléments introduits sont Mn, Zn, Fe (sous forme Fe EDTA), Cu, Co, Mo, B.

L'ensemble du montage et de la solution est stérilisé à 115°C pendant 30 minutes, les flacons communiquant librement par les tubulures avec les entonnoirs filtrants, bouchés au coton, maintenus à niveau convenable. Après stérilisation, les entonnoirs de sable sont arrangés sur des portoirs adéquats et les flacons posés sur un support élévateur, relié à une horloge électrique pouvant commander un rythme choisi de variations de niveau du plan d'eau dans le sable. Tout le dispositif est placé dans une chambre à 20°C de façon à recevoir la lumière du jour (fig. 1).

Les germinations sont déposées dans le sable, le plan d'eau affleurant en surface, lorsque les radicules ont de 0,8 à 1 cm de longueur. Après 48 heures une tigelle s'étant développée, on abaisse de 1 cm le niveau d'eau et on entoure la tigelle de sable fin hydrofugé stérile, réparti sur 1 cm de hauteur, au-dessus du sable grossier. Cette couche de sable hydrofugé est destinée à assurer l'asepsie des parties sous-jacentes sans s'opposer aux échanges gazeux, dans les mêmes conditions que le sable paraffiné souvent préconisé dans ce but (Van Schreven, 1959).

Il est préparé de la façon suivante : on dilue 0,3 ml d'hydrofugeant Rhodorsil 86 (1) dans 9,7 ml de benzène. On verse sur 50 grammes de sable de Fontainebleau en mélangeant soigneusement au mortier. On laisse évaporer le solvant et on répartit en boîtes de Petri pour la stérilisation.

La présence de cette couche de sable permet de supprimer le bouchon de coton sur les tubes entonnoirs. Le plan d'eau est maintenu fixe pendant 5 jours ; il est ensuite régulièrement abaissé et relevé toutes les heures.

Les différentes sources de phosphore qui ont été stérilisées à part, soit à l'autoclave, soit par irradiation $\gamma$, sont introduites aseptiquement dans les flacons de Wolff au 7e jour de culture, à raison de 3 mg de P par flacon, excepté pour le premier qui est relié à des tubes entonnoirs garnis d'un mélange stérile de 200 g de sable et 20 mg d'apatite, introduits aseptiquement dans chacun des 5 tubes après leur stérilisation. Le contenu en P des 100 mg d'apatite est de 12 mg environ. Le second flacon est fourni en P microbien, le troisième en phosphate monopotassique et le quatrième en « métaphosphate » de potassium. Un cinquième flacon est laissé sans P à titre de témoin.

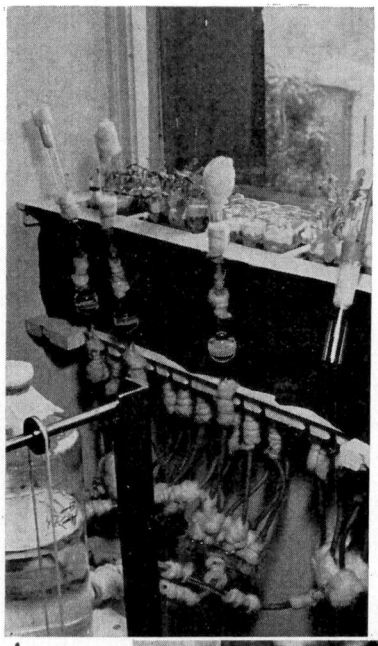
On laisse le développement des plantes se poursuivre pendant 30 jours, en égalisant

(1) Nous remercions la Société Rhône-Poulenc qui nous a procuré gracieusement divers échantillons d'hydrofugeant.

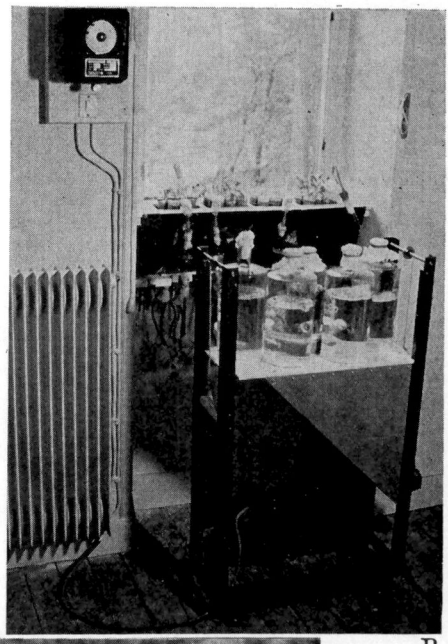
TABLEAU I

*Vitesse de dissolution et d'hydrolyse de 6 échantillons de « métaphosphates » en eau distillée à raison de 1 gramme par litre*

| Échantillons | A | | B | | C | | D | | E | | F | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Métaphosphate de potassium | | Métaphosphate de potassium | | Métaphosphate de potassium | | Métaphosphate de calcium | | Métaphosphate d'ammonium | | Hexaméta-phosphate | |
| | P dissout (%) | P hydrolisé (%) | P dissout (%) | P hydrolisé (%) | P dissout (%) | P hydrolisé (%) | P dissout (%) | P hydrolisé (%) | P dissout (%) | P hydrolisé (%) | P dissout (%) | P hydrolisé (%) |
| En 10 minutes ..... | 100 | 26,0 | 6,9 | 5,0 | 3,1 | 0,8 | 0,35 | 0,3 | 92,8 | 21,8 | 100 | 4,5 |
| En 1 jour ..... | | 26,5 | 26,3 | 5,0 | 7,7 | 1,1 | 2,8 | 0,74 | 93,9 | 46,8 | | 5,4 |
| En 7 jours ..... | | 27,7 | 41,8 | 6,9 | 10,6 | 1,2 | 9,2 | 1,3 | 96,0 | 75,5 | | 6,1 |
| En 15 jours ..... | | 29,8 | 51,7 | 8,2 | 13,9 | 1,4 | 22,6 | 3,1 | 97,7 | 94,8 | | 6,1 |
| En 30 jours ..... | | 30,6 | 67,2 | 8,7 | 19,6 | 1,4 | 51,2 | 10,1 | 98,4 | 95,6 | | 6,9 |
| En 60 jours ..... | | 32,0 | 81,9 | 11,8 | 27,0 | 1,4 | 80,8 | 16,8 | 98,4 | 96,4 | | 8,9 |

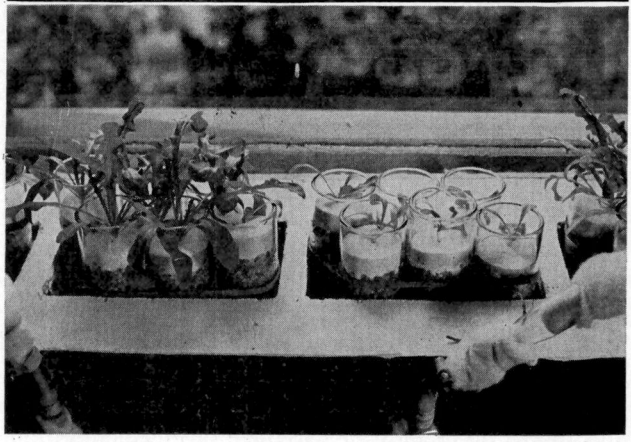


A



B

C



D

FIG. 1. — *Dispositif de culture hydroponique de* Hypochoeris glabra *L.*

A — B — Vue d'ensemble du dispositif

C — Plantules sur P bactérien à gauche et sur polyphosphates synthétiques à droite.

D — Plantules sur polyphosphates synthétiques à gauche, sur apatite à droite
Une plantule sur orthophosphate est visible à l'extrême droite.

les niveaux chaque fois que cela est nécessaire par des cales sous les flacons alimenteurs. A ce stade, les plantes développées sur orthophosphate ont formé de 9 à 11 feuilles. Toutes les plantes sont récoltées, séchées et on détermine le poids sec des racines et des parties aériennes. On dose ensuite le phosphore total après minéralisation sulfo-nitrique par colorimétrie du bleu de molybdène suivant la technique de BEREMBLUM et CHAIN (1936).

## RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Le développement des plantules est sensiblement égal dans les différentes séries pendant la première décade. Il s'arrête alors, d'abord dans la série témoin, puis dans la série de tubes fournis en apatite. Les plantules auxquelles le phosphore est donné sous forme de cellules microbiennes ont un développement progressivement ralenti à partir du 15e au 20e jour. Le bord des feuilles tend à s'enrouler en prenant une teinte cuivrée. Les plantes cultivées sur orthophosphate et sur « métaphosphate » de potassium ont un développement équivalent et un aspect semblable. Les poids secs des racines et des parties aériennes pour chaque série sont donnés dans le tableau 2, les teneurs en P dans le tableau 3. Les valeurs obtenues et leurs moyennes ne peuvent être comparées par analyse de variance et test de *t*, qu'après transformation logarithmique. Si l'on considère le poids sec, on n'observe pas de différence significative entre les plantes témoins sans P et les plantes n'ayant eu à leur disposition d'autre phosphore que celui de l'apatite. Par contre, les différences de teneurs en P des plantes entières sont faiblement significatives. Ces teneurs sont dans un cas comme dans l'autre extrêmement basses, de l'ordre de 1 p. 1 000, et il est évident que la fraction du P apatitique qui a pu être absorbée par les plantes est négligeable. Les différences entre les plantes cultivées sur orthophosphate et sur métaphosphate ne sont pas significatives. Dans les deux cas, à peu près la moitié du phosphore disponible a été absorbée par les plantes. Étant donné la faible proportion de « métaphosphate » qui s'est hydrolysée en orthophosphate dans les épreuves de contrôle ayant la même durée, on serait tenté de conclure que les polyphosphates ont été absorbés aussi bien que l'orthophosphate, comme cela a été montré pour l'orge (ROUX, 1968). En fait, les dosages pratiqués sur les flacons de cette série, de semaine en semaine, ont toujours montré la présence d'orthophosphate à des teneurs atteignant un maximum après 15 jours à environ 0,2 p.p.m. Ce taux ne peut être négligé puisqu'il représente le passage en solution sous forme d'orthophosphate de 12,5 p. 100 du poids de métaphosphate apporté, c'est-à-dire 9 fois plus que dans l'épreuve préalable en eau distillée et en conditions statiques, alors que la plante a certainement déjà prélevé un peu de phosphate dissous ; l'hydrolyse a pu être favorisée par l'excrétion des racines, les variations de force ionique ou les mouvements du plan d'eau. Enfin, le développement des plantes qui n'ont reçu d'autre phosphore que celui des cellules microbiennes est significativement différent de celui de toutes les autres séries. Le phosphore des cellules microbiennes est donc plus disponible que celui de l'apatite, mais il ne peut être utilisé en totalité par les plantules dans les conditions de l'expérience qui sont celles d'un modèle simplifié, encore très éloignées des conditions naturelles et moins favorables au recyclage des éléments immobilisés par les bactéries.

TABLEAU 2

*Poids sec des plantules de* Hypochoeris glabra *L. de trente jours en fonction de la forme de l'apport phosphoré*
(mg pour 1 plantule, 5 répétitions par traitement)

| Sources de P | Racines | | | | Parties aériennes | | | | Plantes entières | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Moyenne logarithmique | Log moyen | Plus petite différence significative entre les log | | Moyenne logarithmique | Log moyen | Plus petite différence significative entre les log | | Moyenne logarithmique | Log moyen | Plus petite différence significative entre les log | |
| | | | P : 0,05 | P : 0,01 | | | P : 0,05 | P : 0,01 | | | P : 0,05 | P : 0,01 |
| 1 Orthophosphate ..... | 12,74 | 1,10527 | | | 70,50 | 1,84817 | | | 83,35 | 1,92090 | | |
| 2 Polyphosphate ..... | 17,48 | 1,24243 | | | 75,61 | 1,87856 | | | 93,36 | 1,97018 | | |
| 3 Bactéries ..... | 12,07 | 1,08185 | 0,222 | 0,323 | 28,42 | 1,45368 | 0,136 | 0,198 | 40,77 | 1,61031 | 0,148 | 0,216 |
| 4 Apatite ..... | 5,73 | 0,75787 | | | 9,06 | 0,95704 | | | 14,85 | 1,17179 | | |
| 5 Témoin sans P ..... | 6,67 | 0,82391 | | | 10,15 | 1,00668 | | | 16,90 | 1,22791 | | |
| Carré moyen entre les logarithmes ..... | 0,023195 | | | | 0,00875 | | | | 0,01037 | | | |
| Différence significative entre : à P : 0,05 ... | 1-2-3 et 4-5 | | | | | | | | | | | |
| P : 0,01 ... | (1-3) et 4<br>2 et (4-5) | | | | (1-2) et 3<br>(1-2) et (4-5)<br>3 et (4-5) | | | | (1-2) et 3<br>(1-2) et (4-5)<br>3 et (4-5) | | | |

TABLEAU 3

*Teneur en phosphore des plantules de* Hypochoeris Glabra *L. de trente jours en fonction de la forme de l'apport phosphoré*
(µg de P par plantule, 5 répétitions par traitement)

| | Racines | | | | Parties aériennes | | | | Plantes entières | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Moyenne logarithmique | Log moyen | Plus petite différence significative entre les log | | Moyenne logarithmique | Log moyen | Plus petite différence significative entre les log | | Moyenne logarithmique | Log moyen | Plus petite différence significative entre les log | |
| | | | P : 0,05 | P : 0,01 | | | P : 0,05 | P : 0,01 | | | P : 0,05 | P : 0,01 |
| 1 Orthophosphate ..... | 56,48 | 1,75186 | | | 229,9 | 2,36150 | | | 287,0 | 2,45787 | | |
| 2 Polyphosphate ..... | 68,67 | 1,83679 | | | 254,0 | 2,40490 | | | 323,0 | 2,50919 | | |
| 3 Bactéries ..... | 28,30 | 1,45185 | 0,214 | 0,311 | 38,01 | 1,56987 | 0,410 | 0,596 | 67,5 | 1,82930 | 0,144 | 0,210 |
| 4 Apatite ..... | 10,17 | 1,00740 | | | 7,21 | 0,85774 | | | 17,42 | 1,24118 | | |
| 5 Témoin sans P ..... | | | | | | | | | 12,01 | 1,07941 | | |
| Carré moyen entre les logarithmes ..... | 0,02145 | | | | 0,07890 | | | | 0,00979 | | | |
| Différence significative entre : à P : 0,05 ... | (1-2) et 3 | | | | | | | | 4 et 5 | | | |
| P : 0,01 ... | (1-2) et 4<br>2 et 3<br>3 et 4 | | | | (1-2) et 3<br>(1-2) et 4<br>3 et 4 | | | | (1-2) et 3<br>(1-2) et (4-5)<br>3 et (4-5) | | | |

Dans ce modèle, les bactéries ont été en présence de l'apatite dans un premier temps, puis récoltées et soumises à divers traitements avant d'être mises en présence des racines dans un milieu où celles-ci étaient le seul élément vivant. Il est établi qu'elles ont assuré ainsi un transfert de P du minerai à la plante qui n'a pu avoir lieu en leur absence, mais ce transfert n'est évidemment pas total, un partage intervenant entre la plante et les microorganismes. Ces points devaient être établis avant d'élaborer des systèmes plus complexes dans lesquels les cellules vivantes d'*Agrobacterium* seront mises en contact simultanément et non plus successivement avec le minerai et les racines en développement.

*Reçu pour publication en avril 1970.*

## SUMMARY

### BIOSYNTHESIS OF CONDENSED PHOSPHATES BY SOIL MICROFLORA AND ITS PART IN PLANT NUTRITION

*Hypochoeris glabra* L. was grown aseptically on sand for one month with a very limited addition of phosphorus in four forms differing in their capacity of supplying the solution with phosphorus ions within the given time : potassium orthophosphate and metaphosphate, apatite, bacterial cells killed after having been cultivated on apatite and thus enriched in polyphosphate. The development of the seedlings was noted and their dry weight as well as their phosphorus content measured after one month.

There was no significant difference between the plants fed with metaphosphate and those fed with orthophosphate. The use of apatite by the plant alone was negligible. The phosphorus from the bacterial cells was significantly more available but could not be totally used under experimental conditions. The bacterial cells are thus certainly capable of transferring phosphorus from the rock phosphate to the plant insofar as they can get their phosphorus direct from the rock phosphate as well as soluble phosphates, which the plant is unable to do.

## ZUSAMMENFASSUNG

### DIE BIOSYNTHESE VON KONDENSIERTEN PHOSPHATEN DURCH DIE MIKROFLORA DES BODENS UND IHRE ROLLE IN DER PFLANZENERNÄHRUNG

*Hypochoeris glabra* L. wurde einen Monat lang aseptisch auf Sand gezüchtet unter eng begrenzter Zugabe von Phosphor in vier verschiedenen Formen, die sich in abnehmender Reihenfolge in der Fähigkeit unterschieden, die Lösung mit Phosphorionen zu versorgen.

Es waren Kaliumorthophosphat und -metaphosphat, Apatit, und auf Apatit gezüchtete und daher mit Polyphosphaten angereicherte, nachher abgetötete Mikrobenzellen. Die Entwicklung der Sprösslinge wurde beobachtet, und ihre Trockengewichte und Phosphorgehalte wurden nach einem Monat gemessen.

Es gibt keine wesentlichen Unterschiede in der Ernährung der Pflanze mit Meta- oder Orthophosphat. Die Verwertung des Apatits durch die Pflanze allein kann vernachlässight werden. Der Phosphor der Mikrobenzellen ist bedeutend verfügbarer, kann aber unter den gegebenen Versuchs bedingungen nicht vollkommen ausgenützt werden. Die Mikrobenzellen sind daher gewiss in der Lage, anorganischen Phosphor gemäss der Verwertung des Minerals für ihre eigene Phosphorernährung in die Pflanze zu überführen, genauso wie die durch die Pflanze unverwertbaren, löslichen Phosphate.

## РЕЗЮМЕ

*Биосинтез фосфатов конденсированных почвенной микрофлорой, и его роль в питании растений.*

А. ТАРДЬЕ-РОШ, П. ТАРДЬЕ.

Пазник (Hypochoeris glabra) выращивался в течении месяца на стериллизованном песке, при узко ограниченной подкормке фосфором, приносившимся в четырех различных формах, отличных по их способности обеспечивать раствор за это время ионами фосфора : ортофосфат и метафосфат калия, апатит, убитые клетки микробов, выращенные перед тем на среде из апатита и обогащенные таким образом фосфором. Велись затем наблюдения за развитием проростков, и по истечении месяца определялись вес их сухого вещества, и содержание в них фосфора.

Не было отмечено никакой существенной разницы в питании растения при подкормках отрофосфатом, или метафосфатом Использование апатита растением как таковым — весьма незначительно. Фосфор микробиальных клеток показательно более доступен, но в условиях опыта не мог быть использован полностью. Это означает что клекти микроорганизмов конечно способны реализовать передачу фосфора апатита растению, только в той мере, в какой они сами используют апатит также как и растворимые фосфаты для своего собственного фосфорного питания, на что растения, сами по себе, абсолютно неспособны.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


Asher C. J., Loneragan J. F., 1966. Response of plants to phosphate concentration in solution culture : I. Growth and phosphorus content. *Soil Sci.*, **103**, 225.

Beremblum I., Chain E., 1938. *Biochem. J.*, **32**, 295.

Carpentier L.-J., 1966. Phosphates condensés : production, propriétés, valeur agronomique. *Bull. docum.*, **43**, I. S. M. A.

Roux L., 1968. Les phosphates condensés en nutrition minérale. Apport d'un polyphosphate de potassium très condensé en culture hydroponique d'orge. *Ann. Physiol. vég.*, **10**, 83.

Tardieux-Roche A., 1966. Contribution à l'étude des interactions entre phosphates naturels et microflore du sol. *Ann. agron.*, **17**, 403-479.

Terman G. L., Seatz L. F., 1956. Crop response to metaphosphate fertilizers. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **20**, 375.

Van Schreven D. A., 1959. Effects of added sugars and nitrogen on nodulation of legumes. *Plant Soil*, **11**, 93.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (3), 315-323.

NOTE ANALYTIQUE

# COMPARAISON DE DEUX MÉTHODES DE DOSAGE DU CARBONE ORGANIQUE, APPLIQUÉES A L'ÉTUDE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE TOTALE DES SOLS OU DE SES DIFFÉRENTES FRACTIONS

Ph. GRAFFIN, G. MONNIER et Cl. JEANDET

*Laboratoire des sols*
*Station centrale d'Agronomie.*
*Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles*
*Institut national de la Recherche agronomique*

## RÉSUMÉ

L'étude porte sur la comparaison de deux méthodes types de dosage du carbone organique des sols : la méthode de ANNE basée sur l'appréciation du pouvoir réducteur des composés organiques, la méthode de SHAW qui consiste en une mesure de la quantité de $CO_2$ formé au cours de l'oxydation sulfochromique.

Après une confrontation des performances des deux méthodes en ce qui concerne leur reproductibilité et leur précision, il est montré que si la méthode de ANNE est parfaitement adaptée à l'étude des matières organiques totales, elle conduit à une surestimation de certaines fractions (matières organiques libres) et à une sous-estimation d'autres fractions (acides humiques et surtout acides fulviques).

La détermination de la teneur en matière organique des sols s'effectue le plus souvent à partir du dosage de deux de ses constituants élémentaires, l'azote et surtout le carbone dont le taux dans les divers groupes de substances considérés est, relativement du moins, plus constant.

Le principe des méthodes utilisées pour le dosage du carbone consiste à oxyder complètement la matière organique du sol par voie sèche ou par voie humide.

— Dans un premier groupe de méthodes, on dose directement l'anhydride carbonique résultant de l'oxydation.

— Dans un deuxième groupe, on mesure la quantité d'oxygène consommée au cours de l'oxydation ; on en déduit la quantité de carbone en admettant que le pouvoir réducteur apparent du carbone organique des sols est constant et peut être déterminé une fois pour toutes par comparaison avec les résultats des méthodes du premier groupe prises comme références.

C'est ainsi que ANNE (1945) a établi que dans les conditions d'oxydation où il se plaçait, la consommation de 32 g d'oxygène correspondait à la présence de 12,3 g de carbone organique et cela, d'une façon suffisamment constante.

De cette équivalence, ANNE a tiré une méthode de détermination du carbone organique total des sols très couramment utilisée en Pédologie et en Agronomie en raison de la facilité de sa mise en œuvre, de sa reproductibilité très satisfaisante et de la généralité de son emploi, même dans le cas des terres contenant des carbonates.

On doit toutefois remarquer que l'équivalence de base a été établie pour des matières organiques totales et non pour les différentes fractions que l'on peut isoler par des méthodes physiques ou chimiques. On peut dès lors se demander dans quelle mesure le pouvoir réducteur apparent du carbone peut être considéré comme invariant dans les différentes fractions et par ailleurs, dans le cas d'une réponse négative à cette question, dans quelle mesure le pouvoir réducteur apparent du carbone d'une fraction peut être considéré comme caractéristique d'un groupe de substances déterminé.

La réponse à la première question posée revêt une importance pratique considérable en raison du développement de nouvelles techniques de dosage du carbone élémentaire après oxydation par voie sèche, pour l'étude des fractions de la matière organique de sols en expérimentation de longue durée, étude effectuée jusqu'ici par la méthode de ANNE.

Aussi, avons-nous entrepris de comparer sur une série d'échantillons convenablement choisis, les teneurs en carbone organique obtenus d'une part, par la méthode de ANNE, d'autre part, par une méthode du premier groupe prise comme référence.

## I. — MÉTHODES UTILISÉES ET CHOIX DES ÉCHANTILLONS

### 1. *Méthode de référence*

Nous avons adopté la méthode de SHAW (1959) en lui apportant quelques aménagements de détail.

Rappelons qu'il s'agit d'une oxydation par voie humide (mélange oxydant phospho-sulfochromique) ; le dosage consistant en une pesée de l'anhydride carbonique formé puis fixé sur de la chaux sodée. Un courant d'air dépourvu de $CO_2$ entraîne les vapeurs issues de l'oxydation. Après avoir été débarrassé de sa vapeur d'eau et des vapeurs nitreuses et sulfureuses, l'air chargé de l'anhydride carbonique traverse des absorbeurs en U tarés, garnis de chaux sodée dans la première branche et de chlorure de calcium anhydre dans la deuxième branche, pour fixer l'eau libérée lors de la carbonatation de la chaux sodée.

La variation de poids des absorbeurs, enregistrée à la fin de l'opération mesure la quantité de $CO_2$ formée et donc, à un facteur de proportionalité près, la quantité de carbone organique oxydée dès lors que l'échantillon étudié ne contient pas de carbonates.

Par rapport au mode opératoire proposé par SHAW, nous avons apporté quelques modifications ou précisions :

— la durée totale de l'oxydation est portée à 35 mm dont 30 mm de chauffe à l'aide d'un microbec Bunsen après 5 mn d'oxydation initiale sans chauffage ;

— le réglage du bec doit être tel que la température dans le ballon d'attaque atteigne un palier de 150° environ au bout des 30 mn de chauffe.

Ces deux conditions permettent l'oxydation de la quasi-totalité du carbone présent sous forme de charbon de bois fréquemment trouvé dans la « fraction libre » de certains échantillons et qu'il serait illusoire de vouloir exclure de la réaction par une oxydation moins poussée et plus sélective.

— A la fin de la réaction, le courant d'air doit continuer à circuler pendant au moins 2 heures encore lorsque le volume libre de l'appareil est de l'ordre de 400 ml et le débit, celui préconisé par

SHAW, de 30 ml/minute. Toute augmentation de ce débit qui permettrait de réduire le temps de balayage entraîne des risques inacceptables de fixation incomplète du $CO_2$ au niveau des absorbeurs.

*Reproductibilité et précision.*

La reproductibilité a été appréciée sur 12 répétitions de divers échantillons de sols ou de substances organiques variées. Les résultats sont groupés dans le tableau 1.

TABLEAU 1

*Reproductibilité et précision de la méthode de* SHAW *modifiée*
(teneur en carbone organique p. 1 000)

| Nature de l'échantillon | Moyenne mesurée | Intervalle de confiance p. 100 | | P. 100 par rapport à la valeur théorique |
|---|---|---|---|---|
| | | P. 0,05 | P. 0,01 | |
| Urée | 199 | 0,5 | 0,75 | 99,5 |
| Acide ascorbique | 407 | 1,1 | 1,50 | 99,3 |
| Glucose | 395 | — | — | 98,7 |
| Cellulose | 438 | 0,3 | 0,4 | 98,7 |
| Oxalate d'ammonium | 169 | 0,2 | 0,3 | 100 |
| Dithioxamide | 199 | 0,9 | 1,3 | 99,5 |
| Limon humifère | 24,7 | 1,0 | 1,4 | — |

Les performances enregistrées peuvent être considérées comme satisfaisantes pour tous les échantillons étudiés et sont très voisines de celles qui avaient été présentées par SHAW.

En ce qui concerne la précision, la dernière colonne du tableau 1 présente, rapportées aux teneurs théoriques lorsqu'elles sont connues, les moyennes observées à l'issue de 12 déterminations. Dans ce domaine également, les résultats sont satisfaisants bien qu'ils soient systématiquement inférieurs ou égaux aux valeurs théoriques.

### 2. *La méthode de* ANNE.

Nous avons adopté la variante qui utilise une solution de bichromate de potassium à 8 p. 100 pour laquelle l'auteur a donné une équivalence de 0,615 mg par ml de sel de Mohr 0,2 N utilisé lorsqu'il s'agit de matières organiques totales de sol. De plus, nous nous sommes efforcés de nous placer dans des conditions telles que le rapport $CrO_3$ consommé/$CrO_3$ total soit aussi constant que possible. Pour les échantillons de substances organiques pures de composition élémentaire connue, nous avons calculé l'équivalence à partir de la réaction d'oxydation complète.

La reproductibilité de la méthode si l'on se place dans des conditions d'oxydation excluant toute surchauffe au cours des 5 mn précises d'ébullition du mélange sulfochromique est du même ordre de grandeur que celle de la méthode de SHAW modifiée : l'intervalle de confiance pour une probabilité de 0,05 et un nombre de répétitions également limité à 12 est de l'ordre de $\pm$ 1 p. 100.

Quant à l'exactitude, si on la considère indépendamment du facteur d'équivalence (*fe*) général proposé par ANNE, c'est-à-dire en comparant les valeurs théoriques aux résultats expérimentaux obtenus à partir de substances dont la réaction d'oxydation est connue, elle est également satis-

faisante (tabl. 2). Par contre, l'utilisation de l'équivalence : 0,615 mg de C pour 1 ml de sel Mohr 0,2 N ne donne de résultats acceptables que pour les « hydrates de carbone », ce qui n'a rien de surprenant.

TABLEAU 2

*Comparaison des résultats obtenus par la méthode de* ANNE *aux valeurs théoriques*
*fe* = facteur d'équivalence

| Échantillons | C p. 1 000 théorique | C p. 1 000 ANNE | |
|---|---|---|---|
| | | *fe* réel | *fe* = 0,615 |
| Glucose ..... | 400 | 400 (100 ) | 400 (100 ) |
| Cellulose ..... | 444 | 440 ( 99,1) | 440 ( 99,1) |
| Oxalate $NH_4$..... | 169 | 177 (104,6) | 44,2 ( 26,1) |
| Citrate Na..... | 202 | 205 (101,5) | 153,6 ( 76 ) |
| Ac. ascorbique .... | 409 | 421 (102,9) | 352 ( 86 ) |
| Diphénylamine .... | 853 | 855 (100,2) | 1 000 (177,2) |

3. *Choix des échantillons*

Nous les avons choisis de façon qu'ils représentent trois groupes intéressant la comparaison à des titres divers.

a) *Substances organiques pures.*

L'équivalence à la base de la méthode de ANNE conduisant à assimiler la matière organique du sol à un ensemble de corps dont le pouvoir réducteur est très proche de celui d'un hydrate de carbone, nous avons retenu, à ce titre, le glucose et la cellulose. En outre, nous avons analysé deux composés dont la molécule ne contenait pas d'oxygène : l'α-naphtylamine et la paraffine afin de nous placer aussi dans des conditions très différentes pouvant servir de référence.

b) *Matières organiques d'apport.*

Il s'agit d'échantillons représentant les matières organiques d'origine végétale apportées directement au sol par les végétaux cultivés — racines — ou plus généralement par les techniques culturales — paille, fumier de ferme, engrais vert — ou lors de défrichement — sciure de bois —.

c) *Matières organiques de sols.*

Ce dernier groupe comprend tout d'abord des matières organiques totales de sols variés qui constituent en quelque sorte des échantillons témoins puisqu'appartenant au domaine contrôle d'application de la méthode de ANNE.

Nous leur avons adjoint des fractions séparées par des méthodes physiques : fractions libres et liées séparées par densimétrie (G. MONNIER, L. TURC et C. JEANSON, 1962) et par des méthodes chimiques : fractions humiques et humine.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'ensemble des résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 3 et exprimés en p. 1 000 de la substance anhydre ou de la fraction séchée à poids constant à 105° lorsqu'il s'agit de matières organiques de sols.

TABLEAU 3

*Comparaison de la méthode de* ANNE *et de la gravimétrie du carbone organique*

| Échantillons | Gravimétrie | | ANNE | | $\frac{C_A - C_G}{C_G} \times 100$ | $\Delta_A + \Delta_G$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Composés organiques définis | $C_G$ (‰) | $\Delta_G$ (%) | $C_A$ (‰) | $\Delta_A$ (%) | | |
| Glucose anhydre | 395 | 0,7 | 402 | 0,5 | + 2,0 | 1,2 |
| Cellulose | 438 | 0,3 | 444 | 0,9 | + 1,3 | 1,2 |
| α-naphtylamine | 820 | 0,0 | 995 | 0,5 | + 21,0 | 0,5 |
| Paraffine | 788 | 0,8 | 1 003 | 0,3 | + 31,0 | 1,1 |
| Urée | 199 | 0,5 | 32,5 | — | — 83,0 | |
| Matières organiques d'apport | | | | | | |
| Farine d'herbe de graminées | 308 | — | 329 | — | + 6 | — |
| Farine de foin et de luzerne | 429 | 0,2 | 433 | 0,5 | + 1 | |
| Farine de racines de RG. anglais | 328 | 2,4 | 315 | 6,5 | — 3 | 8,9 |
| Farine de racines de dactyle | 350 | 0,2 | 345 | 3,5 | — 0,8 | 3,7 |
| Partie de blé | 418 | 0,0 | 436 | 0,9 | + 4 | 0,9 |
| Partie d'orge | 432 | 1,2 | 447 | 1,1 | + 3 | 2,3 |
| Poudre de fumier de ferme | 369 | 0,2 | 392 | 0,5 | + 6 | 0,7 |
| Sciure de bois | 482 | 0,4 | 499 | 0,5 | + 3 | 0,9 |

TABLEAU 3 (Suite)

| Échantillons | Gravimétrie | | Anne | | $\frac{C_A - C_G}{C_G} \times 100$ | $\Delta_A + \Delta_G$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Matières organiques de sol | $C_G$ (‰) | $\Delta_G$ (%) | $C_A$ (‰) | $\Delta_A$ (%) | | |
| *a*) Fractions libres extraites de : | | | | | | |
| Limon humifère | 355 | 3,1 | 339 | 3,2 | — 4,5 | 6,3 |
| Limon sur schiste | 302 | 1 | 320 | 2,5 | + 6,0 | 3,5 |
| Terreau | 342 | — | 356 | — | + 4,1 | — |
| Terre de bruyère | 380 | — | 385 | — | + 1,3 | — |
| *b*) Fractions denses extraites de : | | | | | | |
| Limon humifère | 16,45 | — | 16,15 | — | — 1,9 | |
| *c*) Acides humiques n° 1 | 530 | 0,0 | 515 | 0,5 | — 2,8 | 0,5 |
| *c*) Acides humiques n° 2 | 288 | 1,7 | 274 | 2,2 | — 4,8 | 3,9 |
| *c*) Acides humiques n° 3 | 592 | — | 528 | — | — 10,8 | — |
| *d*) humine | 15,94 | 0,6 | 15,4 | 0,6 | — 3,1 | 1,2 |
| *e*) Matières organiques totales (sol) | | | | | | |
| Argile humifère | 36,8 | — | 37,1 | — | + 0,8 | |
| Limon humifère | 25,0 | 1,0 | 25,3 | 0,7 | + 1,2 | 1,7 |
| Limon sous prairie | 27,1 | — | 26,4 | — | — 2,6 | — |

Dans le groupe des substances organiques bien définies, on peut constater d'une part l'accord entre les deux méthodes pour les composés assimilables à des hydrates de carbone du point de vue de leur pouvoir réducteur (glucose, cellulose) ; d'autre part, il apparaît clairement l'impossibilité d'utiliser la méthode ANNE dès que les substances à doser s'écartent de la composition moyenne C, $nH_2O$ ce qui est le cas de certaines fractions extraites des sols par l'éther par exemple, ou appliquée expérimentalement à des échantillons de terre pour en modifier le comportement.

Dans le deuxième groupe représentant les matières organiques d'apport, il apparaît que quelle qu'en soit l'origine végétale, chaque fois que la différence entre les résultats des deux méthodes peut être considérée comme significative $\left(\frac{C_A - C_G}{C_G} \times 100 > \Delta_A + \Delta_G\right)$, la méthode de ANNE donne des résultats de 3 à 6 p. 100 plus élevés que ceux obtenus par gravimétrie du $CO_2$. Les substances entrant dans la composition des échantillons de ce groupe sont donc en moyenne moins oxydées que la matière organique totale des sols, et ceci est vrai aussi bien pour une herbe de graminée jeune que pour une poudre de fumier très décomposé.

Bien que relativement modérée, cette divergence peut-être gênante lorsqu'on étudie le rendement de transformation de ces apports en « matière organique de sol » avec précision, en particulier au cours de l'analyse de dispositifs expérimentaux au laboratoire.

Dans le troisième groupe, on trouve d'abord confirmation, s'il en était besoin, de la parfaite adaptation de la méthode de ANNE au dosage du carbone organique total.

Par contre, au niveau des fractions, deux cas différents se présentent :

— les fractions libres issues d'un fractionnement densimétrique tendent à avoir un comportement analogue à celui des matières organiques d'apport. A l'exception de la fraction libre du limon humifère pour lequel la différence ne peut-être considérée comme significative en raison de l'erreur importante au niveau de chacune des méthodes, les autres échantillons font apparaître un écart de 1 à 6 p. 100 entre les résultats obtenus par la méthode de ANNE qui sont les plus élevés et ceux obtenus par gravimétrie du $CO_2$. Ces fractions libres étant essentiellement constitués précisément de matières d'apports (résidus de récolte, fumier) non encore décomposées, on constate une convergence avec les conclusions tirées de l'étude du deuxième groupe.

— Par contre, les acides humiques d'origines diverses étudiés, l'échantillon d'humine et de façon moins nette, une fraction liée issue d'un fractionnement densimétrique ont un comportement inverse, la méthode de ANNE fournissant des teneurs en carbone systématiquement plus faibles de 2 à 10 p. 100 que le dosage du carbone organique élémentaire. On peut alors considérer que les constituants de l'humus proprement dit sont des composés plus oxydés qu'un hydrate de carbone si l'on admet (cf. tabl. 2) que l'oxydation sulfochromique pratiquée dans les conditions précisées par ANNE est équivalente à celle préconisée par SHAW, les différences ne pouvant alors être attribuées à une réaction moins complète dans le premier cas.

Il est intéressant de rapprocher ces résultats de la composition élémentaire de fractions humiques et fulviques présentées par KONONOVA (1961). En ne tenant compte que des éléments C, H, O, il est possible de calculer la quantité d'oxygène théoriquement nécessaire pour oxyder 1 g de substance et donc de prévoir l'écart qui existerait entre la méthode de ANNE et un dosage de carbone par gravimétrie du $CO_2$.

On constate que les acides fulviques sont systématiquement plus oxydés que des hydrates de carbone — la sous-évaluation par la méthode de ANNE du carbone effectivement contenu dans l'échantillon variant de 4 à plus de 20 p. 100 suivant l'origine des acides fulviques — ce qui conduit à éliminer ce genre de méthode pour évaluer la teneur en carbone de ces composés après leur extraction.

Par contre, la fraction « acides humiques » a un comportement beaucoup plus irrégulier, ces composés présentant des rapports $\frac{\text{O p.100}}{\text{H p.100}}$ beaucoup plus variables, tantôt inférieurs tantôt supérieurs à 8. Les écarts entre les résultats obtenus par les deux méthodes se situent alors entre + et — 10 p. 100.

## CONCLUSIONS

En définitive, le travail que nous venons de présenter ne permet souvent d'apporter que des réponses nuancées aux questions que nous avons posées en introduction à cette note.

— Lorsqu'il s'agit de substituer à la méthode ANNE un dosage direct de carbone organique pour le contrôle du niveau de *matières organiques totales*, dans une expérience de longue durée par exemple, il ne semble pas que, dans la grande majorité des cas, il faille envisager un terme correctif quelconque pour assurer la continuité des résultats ; on devra toutefois s'assurer qu'en sol dit « non calcaire » parce que ne réagissant pas de façon perceptible à l'acide chlorhydrique à froid, il n'existe pas quelques p. 1 000 de carbone minéral provenant de 1 à 2 p. 100 de carbonate de calcium ou de magnésium (1).

— Par contre, dans le cas d'échantillons riches en matières organiques d'apport ou en *matières organiques libres*, les conclusions qu'on peut tirer dépendent de la précision générale qu'on escompte de l'étude considérée. Les écarts entre les résultats des deux méthodes ne sont jamais, dans le cas des matériaux, pourtant variés, que nous avons étudiés, très importants et il est peu probable qu'ils puissent sérieusement perturber l'interprétation d'essais en plein champ. Il n'en n'est certainement pas de même dans certaines études de pédologie expérimentale, au cours desquelles il paraît même intéressant dans certains cas d'associer les deux méthodes.

— Enfin si, comme nous l'avons indiqué, des méthodes basées sur la constance du pouvoir réducteur apparent du carbone semblent inadaptées au dosage du carbone des acides fulviques, il n'est actuellement pas possible de prendre position de façon précise dans le cas des acides humiques et *a fortiori*, d'autres groupes de composés organiques moins classiquement étudiés.

*Reçu pour publication en avril 1970.*

## SUMMARY

### A COMPARISON OF TWO METHODS OF ORGANIC CARBON QUANTITATIVE ANALYSIS APPLIED TO THE STUDY OF THE TOTAL ORGANIC MATTER OF THE SOIL OR OF ITS VARIOUS COMPONENTS

The subject of this study is the comparison of two methods of estimating the organic carbon in the soil : Anne's method, based on the estimation of the reducing power of the organic components ; Shaws' method, which consists in measuring the quantity of $CO_2$ formed during sulphochromic oxydization.

After comparing the results of the two methods in regard to their reproducibility and accuracy, it was found that while Anne's method is perfectly suited to the study of total organic matter, it leads to an over-estimation of certain fractions (free organic matter) and to an under estimation of others (humic acids and especially fulvic acides).

## ZUSAMMENFASSUNG

### VERGLEICH VON ZWEI BESTIMMUNGSMETHODEN FÜR ORGANISCHEN KOHLENSTOFF MIT BEZUG AUF EINE UNTERSUCHUNG DER GESAMTEN ORGANISCHEN SUBSTANZ DER BÖDEN ODER IHRER FRAKTIONEN

Diese Untersuchung bezieht sich auf den Vergleich von zwei Bestimmungsmethoden für organischen Kohlenstoff im Boden : die auf die Messung des Reduktionsvermögens organischer

(1) On peut pour cela utiliser la méthode proposée par DUPUIS (1969) ou procéder dans le montage de Shaw à une attaque acide sans apport de bichromate de potassium.

Verbindungen basierende Annesche Methode und die Shawsche Methode, die aus einer Messung der Menge des während der Oxydation mit Chromschwefelsäure gebildeten $CO_2$ besteht.

Nach einer Gegenüberstellung der Leistung der zwei Methoden mit Bezug auf die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit wird gezeigt, dass wenn die Annesche Methode vollkommen auf die Untersuchung der gesamten organischen Substanzen abgestimmt wird, sie zu einer zu hohen Veranschlagung gewisser Fraktionen (freie organische Substanzen) und zu einer zu niedrigen von anderen Fraktionen (Humus- und besonders Fulvosäuren) führt.

## РЕЗЮМЕ

*Сравнение двух методов дозировки органического углерода, в применении к изучению общего органического вещества почвы и его разных фракций.*

Ф. ГРАФФЕН, Г. МОННЬЕ, К. ЖАНДЕ.

Сравнивались два типичных метода дозировки органического углерода почв : метод Анн, основанный на оценке восстановительной способности органических соединений и метод Шоу, заключающийся в измерении количеств $CO_2$ образовавшихся во время сульфохромного окисления.

Рассматриваются результаты применения обоих методов в отношении их воспроизводимости и точности, и доказывается затем, что если метод Анн хорошо приєпособлен для изученна общего органического вещества, он в то-же время приводит или к переоценке некоторых фракций этого последнего (свободное органическое вещество), или к недооценке других (фракции гуминовых, и в особенности фульвокислот).

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNE P., 1945. Dosage du carbone organique du sol. *Ann. agron.*, Série A, 161-172.

DUPUIS P., 1969. Dosage des carbonates dans les fractions granulométriques de quelques sols calcaires et dolomitiques. *Ann. agron.*, **20** (1), 61-88.

KONONOVA M. M., 1961. *Soil Organic Matter*. Pergamon Press.

MONNIER G., TURC L., JEANSON C., 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.*, **13**, (1), 55-63.

SHAW K., Organic carbon in soil and plant material. *J. Soil. Sci.*, **10**, 2, 316-326.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (3), 325-327.

# CHRONIQUE DES LIVRES

VAN'T HOFF (J. H.). — IMAGINATION IN SCIENCE. — Berlin, Springer-Verlag, 1967, 18 p. (Traduit en anglais par G. F. Springer).

Dans son discours inaugural prononcé à l'Université d'État d'Amsterdam en octobre 1877, J. H. VAN'T HOFF, après avoir évoqué les difficultés rencontrées pour introduire dans le milieu scientifique la notion de stéréochimie, qui bousculait les idées conventionnelles des chimistes, développe le rôle joué par l'imagination dans le cadre général de la recherche expérimentale. Cette faculté interviendrait au cours du déroulement de l'étude d'une relation causale, aux niveaux suivants :

— le choix de l'objet ou du moment de l'observation,
— la modification de l'objet observé,
— la création d'outils propres à l'étude,
— le choix des correspondances ou des dissemblances,
— l'établissement de l'hypothèse.

Ces différents points sont développés à l'aide d'exemples. Puis, à partir de données empruntées aux biographies de nombreux savants, tels NEWTON ou POISSON, l'auteur démontre qu'à l'imagination est lié un certain don artistique.

En conclusion, l'auteur évoque des compensations possibles au manque d'imagination en sciences, qui ne permettent pas cependant d'atteindre à la large vision du champ scientifique, qu'offre l'imagination.

GAUTIER (J. A.) et MALANGEAU (P.) éd. — MISES AU POINT DE CHIMIE ANALYTIQUE, ORGANIQUE, PHARMACEUTIQUE ET BROMATOLOGIQUE. — 19e série, Paris, Masson, 1970, 208 p.

Cet ouvrage, dix-neuvième de la série, comprend cinq articles :

BARTOS (J.). — Analyse thermique différentielle. Principe ; applications organiques et pharmaceutiques.

BAUDIN (G.). — Principes de l'absorption atomique : ses possibilités en chimie organique et en microanalyse.

BERGER (J.-A.) et PETIT (J.). — Possibilités offertes par l'emploi des supports souples en chromatographie sur couches minces.

CHAIGNEAU (M.). — Aspects actuels de l'analyse des gaz.

BRUN (P.) et PELLERIN (F.). — L'analyse des plastiques. 2e partie : notions sur les adjuvants. Protocole d'analyse complète.

MAIGNIEN (R.). — MANUEL DE PROSPECTION PÉDOLOGIQUE. — Paris, ORSTOM, 1969, 132 p. (Coll. Initiations-documentation techniques nº 11).

Cet ouvrage donne une description de la prospection pédologique et constitue un bon outil pour tout pédologue travaillant sur le terrain.

Une première partie est consacrée au sol : historique et définition, passage d'une roche à un sol, profil et horizons, étude du sol en place, identification des horizons, nomenclature.

La deuxième partie est consacrée à la cartographie pédologique : définition, différentes catégories de cartes, réalisation d'une carte pédologique, moyens à mettre en œuvre, éléments du prix de revient d'une carte pédologique, délais d'exécution, rendement.

PENNINGSFELD (F.) et KURZMANN (P.). — CULTURES SANS SOL ET SUR TOURBE (Traduction française de Hanras (J.)). — Paris, Maison rustique, 1969, 232 p.

L'intérêt de la culture sans sol et de la culture sur tourbe est de pouvoir à tout instant fournir aux plantes l'exacte composition en éléments minéraux dont elles ont besoin.

A l'aide de ces procédés, lorsqu'ils sont bien mis au point, non seulement la simplification du travail est considérable, mais on améliore la production en qualité, en quantité et par voie de conséquence la productivité, puisque les rendements par unité de surface sont exceptionnellement élevés.

Avant de choisir l'une ou l'autre de ces techniques, il faut envisager toutes les caractéristiques de la plante à cultiver, tenir compte de ses exigences et de ses facteurs de croissance dans le contexte particulier à chaque exploitation. Choix du substrat, modalités d'apport d'eau et d'éléments nutritifs, comment créer une « culture industrielle » diminuant les risques et garantissant une production satisfaisante à tous égards, telles sont les indications pratiques qu'apporte cet ouvrage.

L'ouvrage est divisé en 3 parties, l'une consacrée aux cultures hydroponiques, l'autre aux cultures sans sol, enfin la troisième à des cultures spécialisées (fleurs et feuillages à couper, plantes en pots, légumes, pépinières, fraisiers). Il est complété par une annexe sur les maladies et troubles physiologiques des cultures sans sol.

Cet ouvrage est fait de détails pratiques et précis permettant de réaliser ces cultures. Un lexique donne la composition des diverses solutions nutritives utilisées tant en Allemagne qu'à l'étranger.

Une abondante bibliographie complète l'ensemble.

LA FERTILISATION DES CULTURES PROTÉGÉES. — Compte rendu du VI[e] Colloque de l'Institut International de la Potasse, Florence/Italie, 1968. — Berne, Institut international de la Potasse, 390 p.

Ce compte rendu contient les 32 rapports présentés sur les 4 thèmes suivants :

— Importance et développement des cultures protégées ; aspects économiques de la fertilisation des cultures protégées.
— Cultures maraîchères et florales de plein champ et avec techniques de forçage ; paillage plastique.
— Les cultures en serre.
— La fertilisation des plantes cultivées sur milieux artificiels.

BROEKHUIZEN (S.) ed. — ATLAS OF THE CEREAL-GROWING AREAS IN EUROPE. — Vol. 2, Wageningen, 1969, 156 p., 60 cartes en 3 et 5 couleurs.

La connaissance de l'aire de culture des céréales est importante pour l'économie agricole et pour le céréalier. De même la connaissance du comportement écologique et de la croissance des céréales est la condition essentielle d'une culture rationnelle et rentable.

Trois composants sont essentiels :

— espèces et variétés cultivées,
— sol et climat,
— maladies.

Ce volume traite les deux premiers points et comprend 60 cartes.

— Carte 1 : carte physique de l'Europe. Description du climat en Finlande, en Russie d'Europe et dans la péninsule Balkanique.
— Carte 2 : les sols d'Europe. Type de sols propices aux céréales.
— Carte 3 à 6 : les sols propices à certaines céréales : blé, orge, avoine, seigle.
— Carte 7 : Pourcentage des terres arables cultivées en céréales.
— Carte 8 : taille des fermes ayant plus de 2 ha de terres arables.
Quelques réflexions sur les cartes 7 et 8.
— Cartes 9 à 47 : le Blé, l'Orge, l'Avoine et le Seigle dans tous les pays d'Europe dont la partie européenne de l'U. R. S. S. et de la Turquie.
Des explications sont données pour chaque pays :

- tableaux indiquant la région de culture, le nombre d'hectares cultivés et le rendement en quintaux pour chaque céréale,
- diagrammes climatiques,
- données phénologiques (date de semis, levée, floraison, moisson),
- références bibliographiques.

— Cartes 49 et 50 : les stations d'amélioration des céréales en Europe. Description des variétés de céréales.
— Cartes 51 à 60 : distribution géographique des variétés de céréales.

GUIDE DE L'EAU, édition 1970. — Pierre Johanet et Fils, éd., Paris, 750 p.

Cet ouvrage renferme une documentation très importante sur l'eau, sa recherche, son utilisation, son épuration, son rejet et, de façon générale, tout ce qui touche à cet élément si nécessaire à la vie de l'homme.

Les dernières réglementations officielles y sont notamment examinées, amplement développées et commentées. C'est ainsi que tout un chapitre, entre autres, est consacré aux agences de bassins.

Un lexique à 3 entrées donne la correspondance de plus de 3 500 termes techniques de l'eau en français, allemand et anglais.

Un classement clair et pratique permet de trouver immédiatement le nom, la formation, la fonction de plus de 2 500 responsables des problèmes relatifs à l'eau, ainsi que les caractéristiques et l'activité de plus de 60 bâtiments ou engins océanographiques français.

Enfin, un important chapitre cite, classés par départements, tous les services administratifs officiels ayant pouvoir de décision dans les domaines de l'eau, à l'échelon départemental ou régional, avec le nom des responsables.

Ce guide vient à point combler une lacune. Il constitue un outil précieux puisqu'il rassemble, pour la première fois en France, de nombreux renseignements dans un domaine où des réglementations impératives viennent d'être décidées pour préserver cet élément de première nécessité, l'eau.

LUTTE CONTRE LA POLLUTION DES EAUX. RECHERCHES ACTUELLES. — Paris, Eyrolles et Gauthier-Villars, Collection de l'A. N. R. T., 1970, 184 p.

Cet ouvrage a été réalisé par les personnalités scientifiques suivantes : Mme LEYGUE, MM. B. BALETTE, J.-P. BARABÉ, J. BEBIN, G. BRÉBION, R. BRIGGS, G. BUJON, R. CABRIDENC, F. EDELINE, C. GOMELLA, B. HURIET, O. JAAG, K. JONES, J. PRAT, J. RAUX, H. RUFFER.

Les sujets traités ont été exposés et discutés au cours des « Journées de la pollution des eaux » qui avaient été organisées par la Société de Chimie industrielle dans le cadre de la Conférence internationale des Arts chimiques, et qui se sont déroulées à Paris, les 24 et 25 mai 1968, sous la présidence de l'ingénieur général J. PRAT.

Les sujets traités intéressent l'état de la pollution, la corrosion des ouvrages, l'auto-épuration, les modes de traitement, l'eutrophisation et l'épuration tertiaire.

# RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

*Au début de chaque mémoire*, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

*Les mémoires* seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons...; h) *références bibliographiques.*

*Les travaux originaux en anglais* doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

*Pour les autres documents* (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

*Les références bibliographiques* doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

*Pour les articles :* le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) : le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

*Pour les ouvrages :* le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus, le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

*Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies*, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponible est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée et porter les numéros des figures.

*Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils* seront envoyés *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

*Photographies :* Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

*Correction des épreuves :* les auteurs recevront une épreuve à corriger.

*Envoi du manuscrit :* M. Hénin, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

*Le Directeur de la publication:* M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 10-1970

*Dépôt légal: 4e trimestre 1970. N° d'impression: 1136.*

# ANNALES
# AGRONOMIQUES

VOLUME 21 1970 NUMÉRO 4

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, PARIS-7e

*Ann. agron.*, 1970, **21** (4), 335-349.

# EFFETS COMPARÉS DE L'IRRIGATION ET DE LA FUMURE AZOTÉE SUR LES PRODUCTIONS QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DE MAÏS DE VARIÉTÉS DIFFÉRENTES

## I. — Rendements en grain

J. DECAU

avec la collaboration technique de A. Pace et B. Pujol

*Station d'Agronomie et d'Œnologie,*
*67, boulevard Deltour, 31 - Toulouse*
*Institut national de la Recherche agronomique*

RÉSUMÉ

Afin de déterminer l'influence des facteurs écologiques sur le rendement d'un maïs *I. N. R. A.* portant le gène « opaque 2 » un essai factoriel Irrigation × Fumure a été entrepris : le maïs a été soumis, en une expérimentation de plein champ, à 4 fumures azotées (0, 50, 150, 300 kg N/ha) associées à deux conditions d'alimentation hydrique (culture sèche et culture irriguée).

Les rendements obtenus ont varié avec la fumure suivant les relations :

$$y = 38{,}4 + 0{,}13\,x - 0{,}00028\,x^2 \quad \text{(culture sèche)}$$
$$y = 56{,}7 + 0{,}20\,x - 0{,}00048\,x^2 \quad \text{(culture irriguée)}$$

où $y$ exprime les rendements (en q/ha) et $x$ les doses d'azote apportées (en kg/ha).

Les résultats obtenus montrent :

*a*) que l'irrigation détermine, en l'absence comme en présence de fumure, une meilleure minéralisation de l'azote du sol ou une meilleure utilisation de cet élément;

*b*) que l'effet de la fumure azotée sur le rendement est maximal en culture irriguée comme en culture sèche pour un apport de 200 à 220 kg N/ha.

L'action cumulée des 2 traitements a doublé les rendements (témoins : 38,4 q ; traitement optimal : 76,4 q).

On a cherché l'origine et les mécanismes d'action de cet effet favorable de l'apport d'eau et d'azote et montré que la fumure agit seulement par l'accroissement d'absorption d'azote par la plante tandis que l'irrigation exerce une action plus complexe, en partie par l'intermédiaire d'un effet azote, en partie par des voies spécifiques.

L'action favorable des facteurs azote et eau s'exerce tout d'abord au niveau de la synthèse totale de matière végétale par la plante mais l'effet de l'eau se manifeste aussi au niveau des migrations vers le grain.

L'effet favorable de l'azote sur le rendement et sur ses composantes apparaît essentiellement au niveau du nombre moyen de grains par épi tandis que celui de l'irrigation s'exerce d'une manière plus complexe, en partie sur le nombre moyen de grains par épi mais aussi sur le poids moyen d'un grain et le nombre d'épis par pied.

L'auteur indique par ailleurs, comme références, la production et la réaction à la fumure azotée de 2 variétés normales à haut rendement, *Pionneer 368 A* et *Funk's G 17 A*, soumises l'une et l'autre à des apports d'azote croissants dans deux essais aux conditions écologiques et culturales en partie différentes. L'auteur analyse les écarts de rendement observés, qui mettent en évidence la production supérieure des maïs normaux, et tente de distinguer les écarts d'origine spécifiquement variétale de ceux qui résultent de conditions écologiques et culturales différentes.

## INTRODUCTION

La physiologie et la morphologie de l'espèce ou de la variété cultivée, le rendement, la composition des graines dépendent de facteurs génétiques, écologiques et culturaux. Le présent travail a pour objet d'étudier, à partir de cultures de maïs réunissant des conditions génétiques et écologiques variées, les effets relatifs ou d'interaction qu'exercent sur les productions qualitative et quantitative les facteurs culturaux (fumure azotée et irrigation).

Le maïs, qu'il soit utilisé dans l'alimentation humaine ou animale, doit assurer à la fois la couverture des besoins énergétiques et la fourniture de la plus large part possible des protéines de la ration. Dans ce travail, nous nous intéresserons à ces deux aspects de la production de cette plante, en considérant successivement le rendement en grain et la production de protéines sous l'action de deux facteurs, l'eau et l'azote.

Si de nombreuses expériences ont montré le rôle déterminant joué par ces facteurs sur le rendement du maïs, en revanche, l'aspect qualitatif (et notamment l'action exercée par ces facteurs sur la qualité des protéines) n'a été envisagé que dans un nombre beaucoup plus faible de cas. D'autre part, de nombreuses analyses ont mis en évidence le rôle des caractères génétiques et en particulier le rôle du gène « opaque 2 » sur la teneur du grain de maïs en protéines (MERTZ *et al.*, 1964 ; MOSSÉ *et al.*, 1966).

Afin d'étudier, sous des conditions écologiques variées, le rôle de ce gène, nous avions soumis aux mêmes conditions de milieu un maïs portant le gène $o_2$ et un maïs normal génétiquement voisin, *I. N. R. A. 400*. Mais un accident cultural ayant affecté le rendement de ce maïs, nous avons alors comparé le maïs *I. N. R. A.* $o_2$ à deux autres maïs, *Pionneer 368 A* et *Funk's G 17 A*, ne portant pas le gène $o_2$, et par ailleurs, d'origine génétique différente. Elles constitueront pour notre essai *I. N. R. A.* $o_2$ des variétés de référence. Mais les conditions écologiques et culturales de la production de ces deux maïs n'étant pas rigoureusement identiques à celles du maïs *I. N. R. A.* $o_2$, nous serons amenés à discuter du rôle respectif des facteurs écologiques et génétiques.

## PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX

### A. — *Dispositifs culturaux*

Le maïs *I. N. R. A.* $o_2$ (lignée W 64 A $o_2$ × lignée $o_2$ en cours de sélection, issue du croisement A 619 × souche $o_2$ de *Purdue*) est cultivé au champ (expérience factorielle fumure azotée × irrigation) sur un sol argilo-calcaire typique de la région Midi-Pyrénées (BLANCHET *et al.*, 1956). La densité de semis, 62 500 pieds/ha, est la même en présence et en l'absence d'irrigation.

L'azote est apporté avant le semis, lors des dernières façons culturales préparatoires, sous forme d'ammonitrate à 33,5 p. 100 et aux doses de 0, 75, 150 et 300 kg d'élément pur par hectare.

Chaque traitement fertilisant comprend 8 répétitions : 4 sont conduites en culture sèche, 4 en culture irriguée.

L'alimentation en eau, assurée par les pluies (311 mm) et les réserves du sol dans les parcelles sèches, est complétée pour les parcelles irriguées par un apport d'eau par aspersion calculé de manière à limiter à un maximum de 30 p. 100 de la réserve utilisable le déficit du milieu par rapport à la demande climatique. Celle-ci est déterminée, d'une part, à partir des données journalières fournies par un évaporomètre Piche placé près de l'essai (PUECH, 1968), d'autre part, à partir des mesures expérimentales d'E. T. M. en fonction du stade physiologique du maïs (PUECH *et al.*, 1968). Nous avons vérifié la validité d'un tel mode de détermination des besoins en eau du maïs par de nombreuses mesures du déficit climatique, lors d'un essai antérieur conduit sur le même sol (essai *Funk's G 17 A* décrit ci-dessous). L'apport total d'eau d'irrigation dans l'essai de maïs *I. N. R. A.* $o_2$ est de 85 mm.

Le comportement comparé du maïs de référence *I. N. R. A. 400* a été étudié au cours d'un essai factoriel analogue implanté dans une zone éloignée du dispositif expérimental précédent mais dont le sol est de fertilité voisine. Cette culture ayant été affectée dans sa production par une chute de grêle, cet essai n'a pas été retenu (cf. p. 336) ; nous envisagerons seulement ses résultats — dans un prochain mémoire — sous leur angle qualitatif : teneur et nature des matières protéiques du grain.

Le rendement du maïs *I. N. R. A.* $o_2$ sera en revanche comparé à celui de deux variétés américaines, *Funk's G 17 A* et *Pionneer 368 A*, qui donnent des rendements élevés et que nous avons soumises l'une en culture irriguée, l'autre en culture sèche, aux fumures azotées suivantes :

*Funk's G 17 A* : 0 — 165 — 500 — 1 500 kg N/ha
*Pionneer 368 A* : 0 — 50 — 100 — 150 kg N/ha

Les deux maïs sont placés dans des conditions pédoclimatiques et culturales semblables pour la plupart à celles du maïs *I. N. R. A.* $o_2$. Le maïs *Funk's G 17 A* est cultivé sur le même sol et selon les mêmes techniques culturales (densité de semis, irrigation) mais il est soumis à des conditions climatiques en partie différentes (durée d'ensoleillement en cours de culture égale à 1 265 heures pour le *Funk's G 17 A*, égale à 1 101 heures pour l'*I. N. R. A.* $o_2$). Le maïs *Pionneer 368 A*, mis en place sur un sol de même type que le maïs *I. N. R. A.* $o_2$ et soumis aux mêmes conditions climatiques en diffère toutefois par sa densité de semis : 40 000 pieds par hectare.

Des mesures effectuées sur les pieds de maïs de l'essai *I. N. R. A.* $o_2$ situés en bordure des parcelles expérimentales, semés ainsi à une densité de peuplement de 27 800 pieds/ha et bénéficiant d'un ensoleillement beaucoup plus grand que celui des pieds intérieurs correspondants (62 500 pieds/ha) permettent d'évaluer l'influence maximale potentielle des différences climatiques et culturales dont l'effet est susceptible de s'ajouter à l'effet variété.

### B. — *Mesures effectuées à la récolte*

Au cours de chaque essai (excepté l'essai réalisé avec *Funk's G 17 A* qui a fait l'objet d'une analyse simplifiée), nous avons mesuré le rendement en grain et ses composantes : densité, nombre d'épis par pied, nombre de grains par épi et poids moyen d'un grain. Nous avons également déterminé comment se répartissent, entre le grain d'une part, et les organes végétatifs aériens d'autre part, les matières sèches synthétisées en cours de culture.

Enfin, nous avons analysé, pour chaque récolte et pour chacun des traitements, la teneur du grain en azote (méthode Kjeldahl) et celle des autres parties aériennes du maïs (méthode Kjeldahl avec réduction des nitrates).

A partir de ces données, nous avons pu calculer la quantité d'azote absorbée par la plante et se trouvant à la récolte dans le grain ou dans les autres parties aériennes.

### C. — *Expression des résultats*

Au cours des expériences culturales, l'expérimentateur soumet le « sujet » étudié, le maïs par exemple, à des conditions de milieu variées que différencient le plus souvent des « apports » choisis par l'expérimentateur (GRAS et DEFFONTAINES, 1968).

Les résultats obtenus sont ensuite très généralement comparés aux « apports » qui sont fixés et mesurés avec précision par l'opérateur. Mais il est évident que ce mode d'examen des données ne conduit qu'à des résultats relatifs, contingents du milieu étudié, puisqu'ils ne tiennent pas compte des conditions de milieu initiales, c'est-à-dire des niveaux initiaux des facteurs de la production, ni *a fortiori* des conditions nouvelles que créent les apports.

Nous étudierons sommairement l'influence des apports, eau et azote, sur le rendement, puis nous nous efforcerons de définir les niveaux de ces facteurs et nous chercherons leurs relations avec la production du maïs.

Les niveaux des facteurs dans le milieu de culture ne peuvent pas facilement être définis et mesurés à partir du milieu lui-même mais une évaluation physiologique peut en être obtenue en considérant la quantité d'élément absorbée par le végétal. Ainsi une appréciation des conditions de nutrition azotée peut être réalisée par la mesure des quantités totales d'azote absorbées par le maïs.

Nous n'avons pu atteindre ici qu'une sous-évaluation de cette grandeur, la quantité d'azote contenue dans les racines à la récolte n'ayant pu être déterminée. Nous étudierons donc les fonctions Rendement $= f$ (N absorbé) pour les différentes cultures mais en rappelant ici que la variable représente seulement la quantité totale d'azote contenue dans les parties aériennes de la plante.

Une analyse plus approfondie des résultats nous conduira ensuite à étudier l'action des facteurs azote et eau sur la synthèse totale et la répartition des matières sèches dans les parties aériennes du maïs et sur les composantes du rendement.

## RÉSULTATS

### I. — *Influence de la nutrition azotée et hydrique*

#### a) *Influence des apports d'azote et de l'irrigation.*

Le rendement du maïs *I. N. R. A.* $o_2$ augmente d'abord lorsque la quantité d'N apportée varie de 0 à 150 kg/ha puis se stabilise pour des apports variant de 150 à 300 kg/ha tant en milieu irrigué qu'en milieu non irrigué (fig. 1).

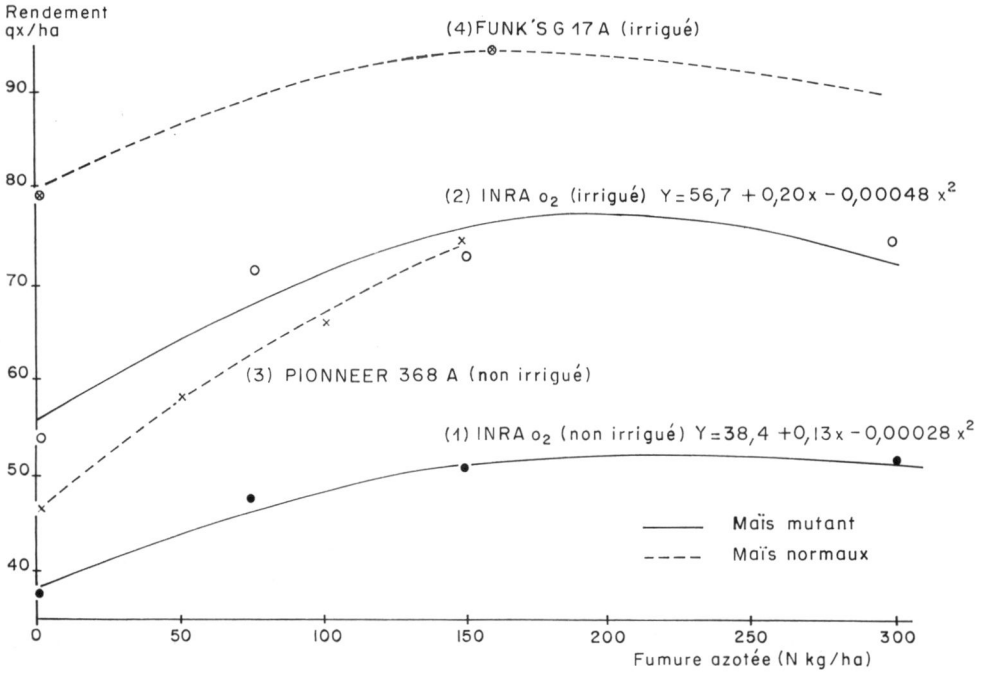



FIG. 1. — *Rendement en grains des maïs en fonction de la fumure azotée et de l'irrigation*

Quelle que soit la fumure (même en son absence), l'irrigation augmente la production du maïs opaque 2. Elle modifie donc probablement les conditions de nutrition et contribue à l'expression du potentiel génétique. Le comportement du maïs *Pionneer 368 A*, cultivé en conditions sèches assez comparables à celle du maïs *I. N. R. A.* $o_2$ non irrigué, paraît être à cet égard, meilleur que celui de ce dernier, mais ici peut intervenir aussi la différence de densité de peuplement des deux cultures.

De même, le maïs *Funk's G 17*, bien qu'il ait été cultivé au cours d'une année précédente donc sous d'autres conditions climatiques, semble, par sa production, supérieur à l'*I. N. R. A.* $o_2$ irrigué.

b) *Influence des facteurs eau et azote.*

1. *Niveaux du facteur azote.*

Les quantités totales d'azote absorbées par les maïs en fonction des traitements s'élèvent avec les apports de cet élément, mais pour une fumure donnée, l'apport d'eau, c'est-à-dire l'irrigation, améliore les conditions de nutrition azotée, c'est-à-dire le niveau du facteur azote (tabl. 1).

TABLEAU I

*Quantités d'azote* (N kg/ha) *retrouvées dans l'ensemble des parties aériennes des maïs de différentes variétés en fonction des traitements*

| Variétés | | | Fumures azotées | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *I. N. R. A* $o_2$ | N apporté | 0 | 75 | 150 | 300 |
| Non irrigué | N absorbé | 85,7 | 125,4 | 166,5 | 193,6 |
| Irrigué | N absorbé | 119,5 | 178,3 | 206,4 | 247,0 |
| *Pionneer 368 A* Non irrigué | N apporté | 0 | 50 | 100 | 150 |
| | N absorbé | 82,7 | 104,5 | 133,1 | 147,9 |
| *Funk's G 17 A* Irrigué | N apporté | 0 | 165 | 500 | 1 500 |
| | N absorbé | 208,4 | 287,6 | 341,0 | 440,2 |

2. *Niveaux du facteur en eau.*

Si nous considérons l'essai réalisé avec le maïs *Funk's G 17 A*, où les consommations totales d'eau au cours du cycle végétatif ont été mesurées pour chacune des fumures, les résultats obtenus montrent que la consommation d'eau diffère très peu selon les traitements (tabl. 2). Cette stabilité de la consommation, malgré des niveaux d'azote très différents, résulte de deux phénomènes antagonistes dont les effets s'équilibrent : l'augmentation de production de matière sèche avec la fumure, qui accroît la consommation, l'élévation de l'efficience de l'eau qui la réduit.

Par ailleurs, la consommation mesurée est ici égale au besoin en eau calculé à partir des mesures bioclimatologiques (évapotranspiration potentielle, rapports E. T. M./E. T. P. en fonction du stade végétatif du maïs (PUECH *et al.*, 1968)) ce qui

résulte de la technique d'irrigation adoptée qui assure le maintien du maïs à l'E. T. M.

Dans l'essai réalisé avec le maïs *INRA* $o_2$, dont les traitements irrigués ont été conduits selon la même technique, les besoins en eau calculés et donc la consommation, atteignent 432 mm.

Dans les essais en culture sèche, par contre, en l'absence de bilan mesuré de l'eau, il n'est pas possible de déterminer le niveau de la consommation mais celui-ci est, selon toute vraisemblance, inférieur à celui des parcelles irriguées correspondantes et, comme le suggèrent les mesures effectuées avec le maïs *Funk's G 17 A*, peu variable selon les niveaux d'azote.

TABLEAU 2

*Consommation et efficience de l'eau pour la culture du maïs* Funk's G 17 A *suivant les niveaux de la fumure azotée*

| Doses d'azote (N/kg/ha) | Eau consommée (mm) | Matière sèche produite (qx/ha) | Efficience de l'eau (kg MS/mm d'eau) |
|---|---|---|---|
| 0 | 553,8 | 167,2 | 30,2 |
| 165 | 565,7 | 200,3 | 35,4 |
| 500 | 545,7 | 193,2 | 35,4 |
| 1 500 | 541,8 | 202,1 | 37,3 |

3. *Action des facteurs azote et eau.*

Afin de mettre en évidence le rôle des deux facteurs, et principalement celui du facteur azote dont les niveaux ont fait l'objet de déterminations précises, nous avons étudié, dans chacun des essais, les variations du rendement du maïs en fonction des quantités d'azote absorbées par la culture.

L'examen de la figure 2 montre qu'il existe des relations étroites entre ces deux grandeurs, ce dont témoignent aussi leurs coefficients de corrélation élevés et hautement significatifs ($r = 0{,}78$ ; 0,81 ; 0,97 ; 0,97 respectivement pour les maïs *INRA* $o_2$ non irrigué et irrigué, *Pionneer 368 A*, *Funk's G 17 A*, pour N absorbé $< 300$ kg/ha). Dans une large zone de la gamme des absorptions d'azote observées, les variations de rendement en fonction du niveau du facteur azote peuvent être considérées comme linéaires (fig. 2) ; mais ceci est le résultat d'une première analyse ; dans un prochain mémoire, nous montrerons que la relation Rendement/Niveau du facteur N cesse d'exister dans certains cas, pour les valeurs élevées de ce facteur, du fait que le rendement atteint un palier.

D'autre part, les données de la figure 2 montrent que l'efficacité de l'azote dans les divers essais et pour une même consommation de cet élément, mesurée par les ordonnées des points de même abscisse des différentes courbes, est nettement plus grande chez les maïs normaux que chez le maïs *INRA* $o_2$ étudié.

Cependant, pour ce dernier maïs, l'élévation par l'irrigation de la valeur du facteur eau augmente l'efficacité de l'azote. Cette augmentation, qui mesure l'effet spéci-

fique de l'irrigation sur le rendement, croît avec la valeur du facteur N (courbes 5 et 6). Elle est en effet de 9,3 q/ha pour une consommation d'azote de 100 kg, de 15,8 q/ha pour 200 kg d'azote. Ces valeurs sont très inférieures à celles qui mesurent l'efficacité globale de l'irrigation pour des fumures azotées égales : l'augmentation de rendement due à l'irrigation, pour un même apport d'azote oscille entre 22,8 et 28,0 q/ha.

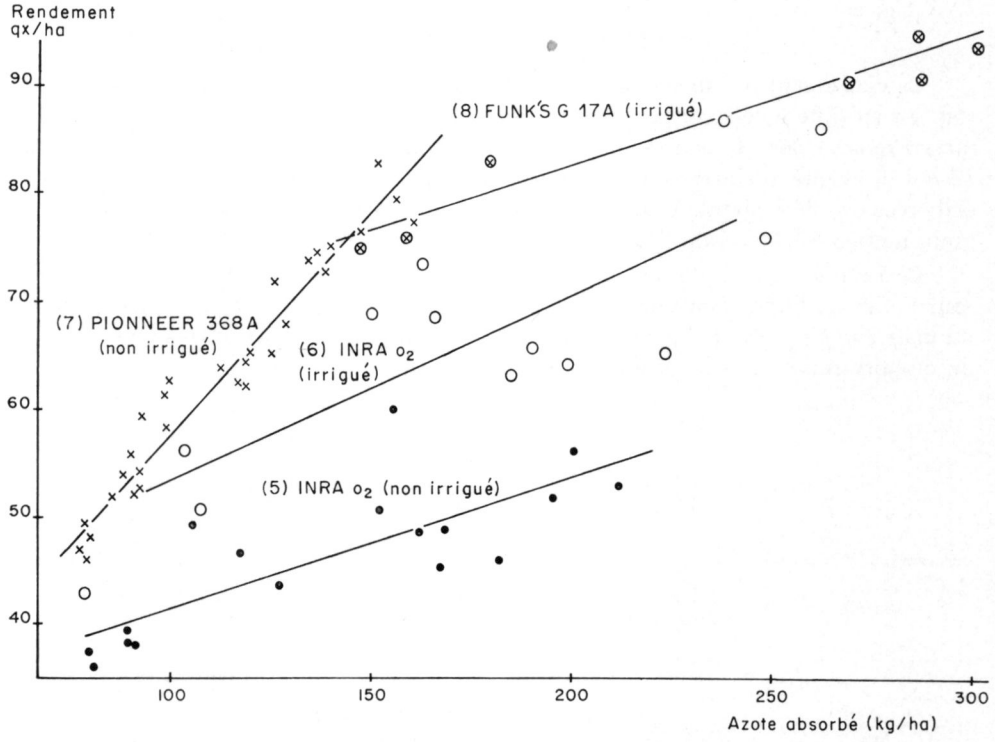



FIG. 2. — *Relation entre le rendement en grain du maïs et la quantité d'azote absorbée par la culture*

Les écarts entre l'effet global de l'irrigation et son action spécifique mesurent les effets de l'irrigation qui s'exercent par l'intermédiaire de l'alimentation azotée. On voit que cette action indirecte de l'irrigation devient moins intense quand, en culture sèche comme en culture irriguée, augmente le niveau du facteur azote.

## II. — *Mode d'action des facteurs eau et azote*

a) *Action sur les synthèses de matière végétale et sur les migrations vers le grain.*

L'analyse des résultats, par la méthode des polynômes orthogonaux, met en évidence l'existence de relations linéaires très étroites entre la production totale de M. S. des maïs, exprimée en q/ha ($y$) et leur consommation d'azote, en kg/ha ($x$) ; ces relations, hautement significatives, observées dans la zone des absorptions faibles ou moyennes d'azote, sont données ci-dessus :

$$y = 0{,}28x + 70{,}28 : \textit{INRA } o_2 \text{ non irrigué}$$
$$y = 0{,}35x + 79{,}34 : \textit{INRA } o_2 \text{ irrigué}$$

$$y = 0{,}26x + 123{,}80 : \textit{Funk's G 17 A}$$
$$y = 0{,}59x + 46{,}86 : \textit{Pionneer 368 A}$$

Si nous comparons la production de matière sèche des maïs pour une même consommation d'azote, 150 kg par exemple, nous voyons que les variétés se placent dans l'ordre :

*INRA* $o_2$ non irrigué ($y_{150} = 112.28$) < *INRA* $o_2$ irrigué ($y_{150} = 131.84$)
< *Pionneer 368 A* ($y_{150} = 135.36$) < *Funk's G 17 A* ($y_{150} = 162.80$)

Ce classement, de même sens que celui observé pour les rendements en grains (fig. 2), en diffère cependant si l'on considère les écarts entre les variétés : ainsi le maïs *Pionneer 368 A*, pour sa production de grain, s'avère très voisin du mutant *INRA* $o_2$ irrigué. Ici intervient le phénomène de migration vers le grain des substances élaborées par le végétal. Une mesure de ce phénomène est donnée par le rapport grain/matière sèche totale (M. S. T.).

Ce rapport, qui est faible chez le maïs *INRA* $o_2$ non irrigué (tabl. 3), augmente sous l'effet de l'irrigation pour atteindre chez cette variété une valeur égale à celle du maïs *Funk's G 17 A*. Le maïs *Pionneer 368 A* diffère des deux autres variétés par un rapport grain/M. S. T. exceptionnellement élevé.

TABLEAU 3

*Variations du rapport grain/matière sèche totale chez les différentes variétés de maïs étudiés*

| Variété | *I.N.R.A.* $o_2$ (culture sèche) | *I.N.R.A.* $o_2$ (culture irriguée) | *Funk's G 17 A* (culture irriguée) | *Pionneer 368 A* (culture sèche) |
|---|---|---|---|---|
| | | ** | | ** |
| Rapport $\frac{\text{grain}}{\text{M.S.T.}}$ ..... | 0,426 | 0,472 | 0,473 | 0,556 |

** Écarts hautement significatifs.

La proportion de matière végétale contribuant à la formation du grain apparaît sous la dépendance de l'irrigation et aussi, selon toute vraisemblance, du potentiel génétique de la variété comme le suggèrent les résultats obtenus avec *INRA* $o_2$ et *Pionneer 368 A*.

L'effet favorable du facteur eau sur le rendement du maïs *INRA* $o_2$ étudié se manifeste à la fois par l'intermédiaire de la synthèse globale de matière végétale au cours du cycle végétatif et par l'action de ce facteur sur les processus de formation du grain (tabl. 4).

Par contre, l'action favorable du facteur azote s'exerce d'une manière différente : tandis qu'augmente la consommation d'azote, la production de matière végétale s'accroît sans que le rapport grain/M. S. T. varie sensiblement.

TABLEAU 4

*Influence des conditions d'alimentation azotée sur la répartition de la matière sèche entre le grain et les pailles du maïs* I. N. R. A. $o_2$ M. S. grain/M. S. pailles)

| N absorbé (kg/ha) | | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Maïs | non irrigué ..... | 0,69 | 0,79 | 0,73 | 0,75 | — |
| | irrigué..... | — | 0,87 | — | 0,89 | 0,89 |

b) *Action sur les composantes du rendement.*

Le rendement (R) du maïs est fonction du nombre de pieds par hectare (N), du nombre moyen d'épis par pied ($n$), du nombre moyen de grains par épi ($n'$) et du poids moyen d'un grain ($p$) :

$$R = N \cdot n \cdot n' \cdot p$$

Le nombre de pieds par hectare, choisi au départ par l'expérimentateur, étant constant dans chaque essai pour les divers traitements, nous avons étudié, pour les variétés *INRA* $o_2$ et *Pionneer 368 A*, l'effet de l'eau et de l'azote sur les 3 autres facteurs.

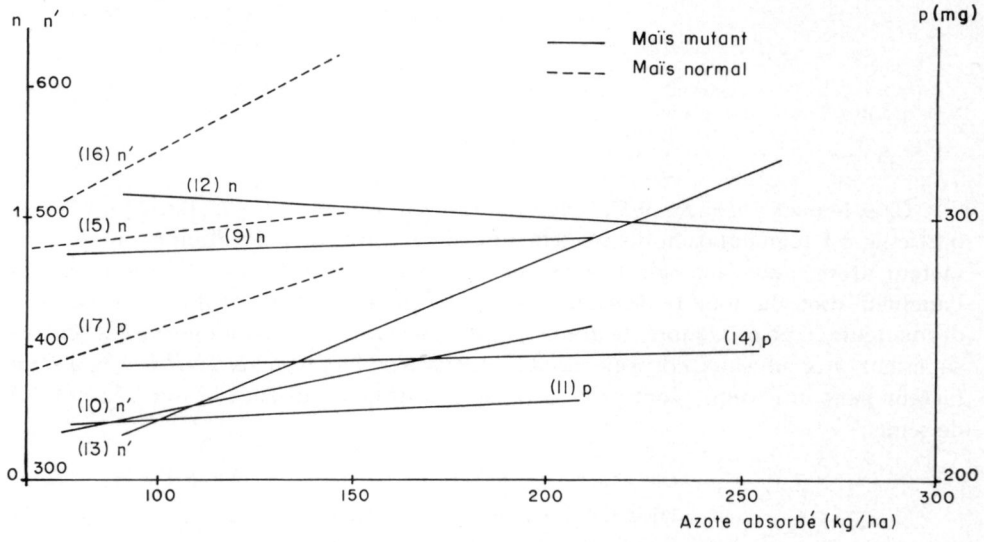



FIG. 3. — *Variation des composantes du rendement en grain du Maïs en fonction des conditions azotée et hydrique*

$n$ = nombre d'épis par pied
$n'$ = nombre de grains par épi
$p$ = poids moyen d'un grain
courbes 9 à 11 : maïs *I. N. R. A.* $o_2$ non irrigué ; courbes 12 à 14 : maïs *I. N. R. A.* $o_2$ irrigué ; courbes 15 à 17 : maïs *Pionneer* non irrigué

Afin de rapporter les résultats au niveau du facteur azote, de préférence aux apports, nous avons étudié la variation de chaque facteur du rendement en fonction de la quantité d'azote absorbée par la culture. Chez le maïs *INRA* $o_2$, nous voyons ainsi (fig. 3 et tabl. 5) que la variation de rendement en fonction des conditions de nutrition azotée est uniquement due à la variation du nombre de grains par épi. Au contraire, à l'augmentation de rendement que procure l'irrigation participent aussi le nombre d'épis par pied et le poids moyen du grain qui s'avèrent statistiquement plus élevés en culture irriguée qu'en culture sèche.

TABLEAU 5

*Relations entre le rendement en grain du maïs et les conditions d'alimentation azotée et hydrique. Fonctions représentatives et écarts-types des paramètres* (1)

| Variété | Alimentation en eau | Nature des fonctions | Écart-type de leurs paramètres | |
|---|---|---|---|---|
| *I. N. R. A.* $o_2$ | Non irrigué | $n = 0{,}000\,5\ N + 0{,}82$<br>$n' = 0{,}530\ N + 296{,}12$<br>$p = 0{,}078\ N + 214{,}96$ | 0,000 3<br>0,223<br>0,062 | 0,054 9<br>31,22<br>8,68 |
| *I. N. R. A.* $o_2$ | Irrigué | $n = 0{,}000\,3\ N + 1{,}039$<br>$n' = 1{,}23\ N + 222{,}3$<br>$p = 0{,}040\ N + 239{,}3$ | 0,000 1<br>0,154<br>0,049 | 0,036 4<br>29,03<br>9,20 |
| *Pionneer 368 A* | Non irrigué | $n = 0{,}001\,7\ N + 0{,}77$<br>$n' = 1{,}53\ N + 398{,}6$<br>$p = 0{,}50\ N + 207{,}3$ | 0,003<br>0,077<br>0,295 | 0,035<br>8,36<br>32,00 |

(1) $n$ = nombre d'épis par pied ; $n'$ = nombre de grains par épi ; $p$ = poids moyen d'un grain ; N = quantité d'azote absorbée en kg/ha).

Chez le maïs *Pionneer 368 A* (fig. 3 et tabl. 5), chacun des 3 facteurs ($n$, $n'$ et $p$) participe à l'augmentation du rendement qui accompagne l'élévation du niveau du facteur azote, mais, analogie avec ce que l'on observe avec *INRA* $o_2$, c'est ici encore l'augmentation du nombre de grains par épi qui joue le rôle déterminant. Le niveau des facteurs $n'$ et $p$ (nombre de grains par épi et poids moyen d'un grain) est ici très supérieur aux niveaux correspondants enregistrés chez le maïs *INRA* $o_2$ mais un facteur peut intervenir, dont nous n'avons pas jusqu'ici discuté le rôle : la densité de semis.

## DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Dans ce mémoire, sont rapportés puis comparés les résultats de 3 expériences culturales dans lesquelles sont mises en jeu des variables contrôlées, fumure, irrigation, différences variétales, mais où interviennent aussi des différences écologiques ou culturales qui surajoutent leurs effets aux écarts variétaux.

S'il nous a donc été possible de déterminer, pour une variété donnée, *INRA* $o_2$ notamment, l'influence de la fumure et de l'irrigation sur le rendement, de telles différences n'intervenant pas au sein d'un même essai, nous n'avons pu, à partir des seuls résultats rapportés jusqu'ici, déterminer l'influence spécifique du potentiel génétique des variétés, les effets globaux variété mesurés jusqu'ici pouvant intégrer un effet ensoleillement ou densité de peuplement.

Afin de déterminer l'effet maximum possible de cette différence climatique ou culturale, nous avons mesuré et comparé les productions fournies par les maïs *INRA* cultivés à forte densité (62 500 pieds/ha) d'une part, à faible densité (27 750 pieds/ha) d'autre part. Les résultats, rapportés au pied de maïs et non plus à l'hectare, ont été comparés à ceux obtenus avec les variétés normales.

Cette méthode permet d'obtenir une valeur maximum de l'effet peuplement ou ensoleillement car, d'une part, la différence de peuplement des maïs *INRA* $o_2$ est supérieure à celle qui sépare maïs mutant et maïs *Pionneer 368 A* et aussi parce qu'elle est telle qu'elle implique une différence d'ensoleillement par pied supérieur aux 15 p. 100 qui séparent *Funk's G 17 A* et *INRA* $o_2$ ; d'autre part, l'examen des rendements par pied élimine de l'effet peuplement tout phénomène de compensation qui apparaîtrait en considérant les rendements par hectare.

Grâce à la mesure de cet effet maximum potentiel des écarts climatiques et culturaux on peut déterminer l'effet minimum spécifique de la variété.

Les données du tableau 6 ci-dessous indiquent les résultats ainsi obtenus, pour un niveau d'absorption d'azote identique dans toutes les variétés et suffisamment élevé pour fournir, excepté chez *Pionneer 368 A*, un rendement non significativement différent du rendement maximum.

TABLEAU 6

*Influence potentielle maximum des conditions climatiques ou culturales et rôle minimum du potentiel génétique de la variété sur le rendement en grain des maïs* (N absorbé = 3 g/pied)

| Variété | Conditions culturales | | Production grain (g/pied) | Effet global variété (g/pied) | Effet peuplement (g/pied) | Effet spécifique (g/pied) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Peuplement (nombre de pieds/ha) | Alimentation en eau | | | | |
| I. N. R. A. $o_2$ ... | 62 500 | Non irrigué | 82 | | | |
| I. N. R. A. $o_2$ ... | 27 750 | — | 125 | | + 43 | |
| *Pionneer 368 A* | 40 000 | — | 167 | + 85 | | + 42 |
| I. N. R. A. $o_2$ ... | 62 500 | Irrigué | 117,5 | | | |
| I. N. R. A. $o_2$ ... | 27 750 | — | 137,5 | | + 20 | |
| *Funk's G 17 A.* | 62 500 * | | 137 | + 14,5 | | — 5,5 |

* Ensoleillement supérieur de 15 p. 100 à celui des autres maïs.

La diminution du peuplement provoque, chez *INRA* $o_2$, une augmentation très significative en grain par pied. Nous constatons que cette augmentation, qui mesure l'effet maximum possible du peuplement ou de l'ensoleillement, annule l'effet

minimum variété de *Funks' G 17 A* mais laisse subsister un effet minimum spécifique positif de *Pionneer 368 A*. Il existe donc à coup sûr une différence de productivité, dans nos conditions de culture, entre le maïs *INRA* portant le gène $o_2$ et le maïs normal *Pionneer 368* A.

La présente étude met donc en évidence la large plage de production que l'on peut obtenir au moyen d'un maïs mutant portant le gène opaque 2, générateur d'un enrichissement du grain en lysine. Mais ce travail montre aussi la supériorité sur le mutant d'un maïs normal très productif.

Il est d'autre part montré que l'effet des facteurs azote et eau, facteurs nutritionnel et écologique dont l'agriculteur a la maîtrise, exercent leur action sur le rendement du maïs par des voies nettement différentes : tandis que l'élévation du niveau du facteur N par la fumure entraîne une augmentation globale de la synthèse de matière végétale, augmentation qui se répartit de façon à peu près égale entre le grain et les autres organes de la plante, l'amélioration de l'alimentation en eau par l'irrigation exerce une action plus complexe qui affecte à la fois l'alimentation azotée de la plante (action indirecte), la synthèse totale de matière végétale et la migration des substances vers le grain (actions directes et spécifiques).

La comparaison des résultats obtenus avec le maïs mutant et avec les variétés normales permet aussi de souligner la complexité des interactions qui lient les différents facteurs de production ; cette étude montre ainsi combien est difficile la recherche des conditions écologiques favorables à la pleine expression des potentialités génétiques du végétal, vu l'ampleur des interactions qui existent entre les facteurs génétiques, écologiques, nutritionnels et culturaux.

*Reçu pour publication en juin 1970.*

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout particulièrement ici le Laboratoire du Maïs (Station d'Amélioration des Plantes de Clermont-Ferrand, I. N. R. A.) qui nous a fourni les semences du maïs hybride expérimental opaque 2 à partir duquel ont été obtenus les résultats présentés dans ce mémoire.

## SUMMARY

### A COMPARISON OF THE EFFECTS OF IRRIGATION AND OF NITROGEN DRESSING ON THE QUALITATIVE AND QUANTITATIVE PRODUCTION OF DIFFERENT VARIETIES OF MAIZE. I. — GRAIN YIELDS

In order to determine the effect of ecological factors on the yield of an *I. N. R. A.* maize carrying the « opaque 2 » gene, a factorial trial of irrigation × fertilizer was undertaken. The experimental maize, grown in the open, was given 4 different rates of nitrogen dressing (0, 50, 150 and 300 kg N/ha) in combination with two different water supply conditions (dry and irrigated crop).

Yields varied in relation to fertilizer rates in the following proportions :

$$y = 38{,}4 + 0{,}13\,x - 0{,}000\,28\,x^2 \quad \text{(dry crop)}$$
$$y = 56{,}7 + 0{,}20\,x - 0{,}000\,48\,x^2 \quad \text{(irrigated crop)}$$

the yields $y$ being expressed in q/ha and the nitrogen dosage $x$ in kg/ha.

The results show that :

*a*) irrigation with or without fertilizer obtains a better breakdown of the nitrogen in the soil, or a better utilization of that element ;

*b*) the maximum effect of nitrogen fertilizer on yield from both dry and irrigated crops is obtained by an application of from 200 to 220 kg N/ha.

The cumulative effect of 2 treatments doubled the yield (control crop : 38,4 q ; best result : 76,4 q).

When investigating the origin and mechanism of the optimal use of water and nitrogen, we found that while the fertilizer acts only by increasing the plant's nitrogen absorption, irrigation has a more complex action, partly as a medium for the nitrogen effect and partly in specific ways.

The favourable action of the nitrogen and water factors begins at the level of the plant's total synthesis of vegetable matter, but the effect of the water is also evident in the level of transmission to the grain.

The improvement effected by nitrogen on the yield and its component parts is essentially a matter of the average number of grains on an ear, whereas the favourable action of irrigation is more complex, affecting not only the average number of grains per ear but also the grain's average weight and the number of ears per plant.

The author also mentions for comparison the production and the reaction to nitrogen fertilizer of 2 normal high-yield varieties, *Pioneer 368 A* and *Funk's G 17 A*, both submitted to increasing dosages of nitrogen in two tests made under partly differing ecological and growing conditions. The author analyzes the scatter in the yield figures observed, which demonstrate the superiority of yields from normal maize varieties, and he tries to distinguish between scatter specifically due to the variety and that resulting from different ecological and growing conditions.

## ZUSAMMENFASSUNG

### VERGLEICH DER WIRKUNGEN VON BEWÄSSERUNG UND STICKSTOFFDÜNGUNG AUF DIE ERZEUGUNG, IN QUALITATIVER UND QUANTITATIVER HINSICHT, VERSCHIEDENER MAISSORTEN. I. — KORNERTRÄGE

Um den Einfluss der ökologischen Faktoren auf den Ertrag einer das Gen « opaque 2 » tragenden Maissorte *I. N. R. A.* zu bestimmen, wurde ein faktorieller Versuch : Bewässerung-Düngung unternommen : bei auf offenem Felde durchgeführten Versuchen wurde der Mais 4 Stickstoffsdüngungen (0, 50, 150, 300 kg N/ha) unterworfen, die unter zwei Wasserversorgungsbedingungen (Trockenkultur und Bewässerungskultur) durchgeführt wurden.

Die erzielten Erträge wechselten mit der Düngung gemäss folgenden Beziehungen :

$$y = 38{,}4 + 0{,}13\,x - 0{,}000\,28\,x^2 \quad \text{(Trockenkultur)}$$
$$y = 56{,}7 + 0{,}20\,x - 0{,}000\,48\,x^2 \quad \text{(Bewässerungskultur)}$$

worin $y$ die Erträge (in q/ha = Dz/ha) und $x$ die zugebrachten Stickstoffmengen (in kg/ha) darstellen.

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass

*a*) die Bewässerung in Abwesenheit, wie in Anwesenheit einer Düngung, eine bessere Mineralisierung des Bodenstickstoffes oder eine bessere Ausnützung dieses Elementes veranlasst.

*b*) im Falle einer Bewässerungskultur sowie im Falle einer Trockenkultur und für eine Zufuhr von 200 bis 220 kg N/ha die Wirkung der Stickstoffdüngung auf den Ertrag maximal ist.

Die vereinigte Wirkung der zwei Behandlungsverfahren hat die Erträge verdoppelt (Kontrolle : 38,4 Dz ; optimale Behandlung : 76,4 Dz).

Die Ursache und die Wirkungsmechanismen dieser günstigen Wirkung dieser asser- wund Stickstoffzufuhr wird untersucht. Es wurde festgestellt, dass die Düngung alleine durch die Zunahme der Stickstoffsabsorption der Pflanze einwirkt, während die Bewässerung eine komplexere Wirkung, teilweise durch Stickstoffwirkung, teilweise durch spezifische Wirkungen, ausübt.

Die günstige Einwirkung der Stickstoff- und Wasserfaktoren findet zuerst als totale Synthese pflanzlicher Stoffe durch die Pflanze statt, während die Wasserwirkung sich auch bei den Migrationen in Richtung des Kornes auftritt.

Die günstige Stickstoffwirkung auf den Ertrag und auf die Bestandteile zeigt sich im wesentlichen in der mittleren Körneranzahl pro-Kolben, während die Bewässerungswirkung komplexerer Art ist, sich teilweise auf die Mittelzahl der Körnern pro-Kolben, jedoch auch auf das Mittelgewicht eines Kornes und auf die Kolbenzahl pro-Stengen beziehend.

Der Verfasser verweist als Referenz auf die Erzeugung und auf die Reaktion hinsichtlich einer Stickstoffsdüngung von zwei normalen Maissorten mit hohem Ertragsniveau hin : *Pionneer 368* A und *Funk's G 17 A*, die in zwei Versuchen mit verschiedenen ökologischen und kulturellen Bedingungen einer zunehmenden Stickstoffsversorgung unterzogen wurden.

Hierfür werden die beobachteten Ertragsunterschiede, die die überlegene Erzeugung der normalen Maissorten unterstreichen, analysiert und es wird versucht, die Abweichungen die speziell von der Sorte abhängig sind von jenen, die sich aus unterschiedlichen ökologischen und kulturellen Bedingungen ergeben. zu unterscheiden.

## РЕЗЮМЕ

*Сравнительные эффекты орошения и азотного удобрения на количественную и качественную продукцию разных сортов кукурузы.* I. *Зерновая продукция.*

Ж. ДЭКО.

Чтобы определить влияние экологических факторов на продуктивность кукурузы И. Н. Р. А. — носительницы гена « опак 2 », был проведен факториальный опыт орошение-удобрение : полевая культура кукурузы получала 4 различных дозы азота (О, 50, 150, 300 кг. N/га), в сочетании с двумя условиями водного питания (культура без орошения, поливная культура).

Полученные урожаи изменялись в зависимости от удобрения по формулам :

$$y = 38{,}4 + 0{,}13\,x - 0{,}00028\,x^2 \text{ — (культура без орошения)}$$

$$y = 56{,}7 + 0{,}20\,x - 0{,}00048\,x^2 \text{ — (орошаемая культура)}$$

в которых у прдесавляет урожай (в ц/га) и $x$ — внесенные дозы азота (в кг/га). Полученные результаты показывают следующее :

*а*) Орошение вызывает, как в присутствии, так и в отсутствии удобрения, лучшую минерализацию азота почвы, или лучшее использование этого элемента.

*б*) Максимальный эффект азотного удобрения в орошаемой и неорошаемой культуре вызывается внесением 200-220 кг N/га.

Совместное действие обеих обработок повысило урожайность в 2 раза (контроль : 38,4 ц, оптимальная обработка : 76,4 ц.)

Попытка выяснить природу и механизм действия положительного эффекта комбинированного внесения влаги и азота, доказала, что действие удобрения состоит только в увеличении поглощения азота растением, в то время как орошение действует более сложным образом, частично посредством эффекта азота и частично — специфическими путями.

Положительное действие факторов азот и влага осуществляется прежде всего на уровне общего синтеза растительного вещества растением, в то время как эффект только влаги проявляется также и на уровне миграций в направлении зерна.

Положительный эффект азота на урожай и его составные проявляется главным образом на уровне среднего числа зерен в колосе, в то время как орошение оказывает благоприятное действие более сложного характера : частично также на уровне среднего числа зерен, частично в отношении среднего веса одного зеран и числа колосьев на растение.

Делается также ссылка на продукцию двух нормальных высоко-продуктивных сортов кукурузы Пионеер 368 А и Функ'с Г 17 А, и их реакцию на азотное удобрение полученное ими в двух полевых опытах, проведенных в частично разных экологических и культуральных условиях. Анализируются разницы величин полученных урожаев, указывающих на большую продуктивность нормальных сортов, и делается попытка дифференциации различий чисто сортового происхождения, от различий вызванных разницей эколо[illegible]ских и культуральных условий.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BLANCHET R., MAERTENS C., MARTY J.-R., GELFI N., 1966. Influence des constituants minéraux de quelques types de sols sur leurs propriétés physiques et leurs possibilités culturales. *Bull. Assoc. Fr. Ét. Sol*, **9**, 257-274.

GRAS R., DEFFONTAINES J.-P., 1968. Communication personnelle.

MERTZ E. T., BATES L. S., NELSON O. E., 1964. Mutant gene that changes protein composition and in creases lysine content of maize endosperm. *Science*, **145**, 279-290.

MOSSÉ J., BAUDET J., LANDRY J., MOUREAU Th., 1966. Étude sur les protéines du maïs. II. Comparaison entre les compositions en acides aminés et les proportions mutuelles des fractions protéiques de grains normaux et mutants. *Ann. Physiol. vég.*, **8** (4), 331-344.

PUECH J., 1968. Premiers résultats concernant une étude expérimentale d'évapotranspiration potentielle dans la région toulousaine et le rôle des brise-vent. *Plante, Sol, Climat et Irrigation*. 1-23, I. N. R. A., Sta. agron., Toulouse.

PUECH J., MAERTENS C., FIORAMONTI S., MARTY J.-C., COURAU M., 1968. Comparaison des consommations d'eau et des productions de matière sèche de quelques cultures irriguées. *Ann. agron.*, **19** (3), 365-377.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (4), 351-384.

# ÉTUDE DES EFFETS RÉSIDUELS DES CULTURES FOURRAGÈRES SUR LES CULTURES ARABLES

## IV. — Influence des modalités de retournement d'une prairie sur les performances d'un blé et d'un maïs

P. JACQUARD (1), L. CROISIER et G. LEFÈVRE*
avec la collaboration technique de R. Traineau

*Station d'Amélioration des Plantes fourragères, 86 - Lusignan*
**Station d'Agronomie, 80 - Amiens*
*Institut national de la Recherche agronomique*

---

RÉSUMÉ

Les modalités de retournement d'une prairie sont un facteur important de ses effets résiduels. Les résultats présentés ici concernent la première et la deuxième années de mesure de leur manifestation globale au moyen d'un blé d'hiver et d'un maïs.

L'essai était du type factoriel avec pour variables :

1° les dates de retournement (juin, août) ;

2° les dates d'apport d'azote (au retournement, au semis de la culture) ;

3° les doses d'azote (0 ou 50 kg/ha).

Les données recueillies, outre celles concernant les cultures, ont trait à l'évolution de l'azote minéral dans le sol, étudiée sur des prélèvements bimensuels.

Les analyses de sol indiquent, notamment, que la plante extériorise par anticipation ce qui se passe dans un sol nu au point de vue de la minéralisation ; en quelque sorte, la présence d'une végétation accélère la manifestation des phénomènes.

Cependant, il paraît difficile de conclure en envisageant l'ensemble des performances des deux cultures :

1° pour le blé, il est évident que c'est surtout l'azote apporté au semis qui a marqué ;

2° pour le maïs, sans aucun doute, les conditions de l'année, qui peut être considérée comme sèche, ont nivelé les rendements.

A nouveau, l'une des conclusions de cette expérience est qu'il est nécessaire d'utiliser plusieurs cultures cultures-tests, car le comportement d'une seule plante peut masquer les effets :

1° soit que des incidences climatiques importantes minimisent les possibilités du végétal ;

2° soit que son rythme végétatif propre ne soit pas en concordance avec l'expression des effets.

(1) Adresse actuelle : C. E. P. E., BP. 1018, 34 - Montpellier.

## I. — INTRODUCTION

Limitée autrefois à des apports périodiques de fumier, la fumure organique a pris une importance croissante, en particulier, avec la pratique de nouvelles méthodes de culture, telles que le retournement périodique des prairies. Les modalités d'un retournement sont donc importantes. Ainsi, une *étude d'engrais vert, réalisée à la Station de Woburn* (Angleterre), expérimentation ayant duré 7 ans (1955-1961), a permis de différencier l'effet du Trèfle ou du Ray-grass, semés en juillet en engrais vert, et suivant l'époque d'enfouissement :

| Traitements | | Rendements relatifs (%) en orge (1) | |
|---|---|---|---|
| Pomme de terre — Orge | | 100 | |
| Pomme de terre | | Ray-grass | Trèfle |
| Engrais vert-Orge | enfoui à l'automne | 117 | 131 |
| | enfoui au printemps | 134 | 145 |

(1) Moyenne de deux niveaux de fertilisation azotée sur les cultures arables.

Si l'effet bénéfique de l'engrais vert dérobé apparaît très nettement, sa date d'enfouissement est déterminante. *On voit qu'il faudra une grande prudence lors d'études par voie d'enquêtes.*

Le mode de retournement jouera aussi beaucoup : plus pour une pâture que pour une fauche. La culture suivante bénéficiera ou non de l'amélioration suivant la profondeur du labour.

Une expérience faite par BARKER (1963) à Cambridge met aussi en évidence l'influence des *techniques culturales sur le rendement.* Elle comparait deux rotations, le semis étant préparé avec quatre outils ; les rendements en blé furent les suivants (q/ha) :

| | Charrue à soc | Rotovator | Canadien | Disque | $\overline{X}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Pomme de terre-blé-betterave sucrière-orge | 42,3 | 40,1 | 40,1 | 39,5 | 40,5 |
| Ray-grass d'Italie + Trèfle violet-blé-betterave sucrière-orge | 39,6 | 32,4 | 27,0 | 26,6 | 31,4 |
| $\overline{X}$ | 40,9 | 36,2 | 33,5 | 33,0 | |

L'auteur constata que seule la charrue à soc permit d'éliminer le Ray-grass. Avec les autres outils, il put repousser et se comporter en adventice pour le blé. Cette expérience, qui pourrait être citée comme exemple d'interaction rotation-adventices, est très instructive et *met l'accent sur la nécessité de préciser*, lorsqu'il s'agit de la valeur d'un précédent, les conditions techniques.

Ceci explique pourquoi il a paru nécessaire d'étudier les modalités de retournement des prairies temporaires, d'une durée maximum de cinq ans, introduites dans une rotation de cultures arables ou dans un assolement fourrager. L'analyse a principalement été axée sur la date à laquelle la prairie doit être « cassée » et sur l'interaction possible de ce facteur avec l'apport ou non d'azote. Le problème posé peut se définir ainsi : un retournement précoce, en juin, amputant le rendement total de deux exploitations au moins, mais laissant à l'agriculteur le temps de bien préparer son terrain pour un semis de blé, par exemple, est-il préférable à un retournement plus tardif, laissant peu de possibilités à la matière organique de se décomposer avant l'hiver ?

Les résultats présentés ici concernent deux années de mesure (1967 et 1968) de la manifestation globale des effets au moyen d'un blé d'hiver et d'un maïs (rendements en grain et productions totales de matière sèche), ainsi que l'étude de l'évolution de la matière organique et de la nitrification depuis le retournement de la prairie.

## II. — DESCRIPTION DU DISPOSITIF ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

### 1. *Dispositif*

Il s'agit d'un essai factoriel comportant : 2 dates de retournement, 2 doses d'azote, 2 dates d'apport de l'azote, soit 8 traitements, et 6 répétitions. Les parcelles élémentaires sont de 50 m² (JACQUARD et coll., 1969 a).

### 2. *Phase préparatoire*

Cette phase a débuté au printemps 1962 par l'implantation d'une prairie homogène de Dactyle « Floréal » (semé à 10 kg/ha), associé à du Trèfle blanc « Ladino » (2 kg 5/ha), en lignes alternées à 19,2 cm d'écartement.

Chaque année et jusqu'au mois de juin 1966, l'exploitation et la fertilisation ont été effectuées de façon semblable sur l'ensemble de l'esssai. La fumure de fond comportait l'apport de 100 kg/ha/an de $P_2O_5$ et $K_2O$, respectivement. L'azote était appliqué en fractionnement: 20 kg/ha en hiver et la même dose après chaque exploitation, jusqu'à concurrence de 100 kg/ha/an.

Les rendements en matière verte et matière sèche ont été déterminés à chaque exploitation sur des prélèvements de 6 m². Cette exploitation a été réalisée au rythme « pâture », c'est-à-dire que la première intervention se situait chaque année au moment où l'épi atteignait une hauteur de 10 cm dans la gaine ; les deuxième et troisième interventions s'effectuaient après 40 jours de repousse, les autres après un temps de repos de 60 jours. Au cours des années 1962 et 1963, l'herbe a été effectivement consommée par de jeunes bovins ; par la suite (1964 à 1965) la pâture a été « simulée » à la barre de coupe afin de minimiser l'hétérogénéité introduite par la présence d'animaux.

Les données recueillies, outre le rendement en matière sèche, comportaient aussi les exportations d'azote.

### 3. *Phase de mesure*

En 1966, chaque parcelle élémentaire de 50 m² de la phase précédente, fut subdivisée de façon à porter, par moitié, un blé d'hiver ou un maïs, selon les traitements culturaux indiqués au tableau 1.

Le Blé appartenait à la variété « Cappelle » et fut établi à 250 plantes/m² en lignes écartées de 19,2 cm ; le Maïs à la variété « I. N. R. A. 260 » (75 000 pieds/ha en lignes à 80 cm).

Les surfaces prélevées et les mesures effectuées ont été réalisées comme pour les autres essais (JACQUARD et coll., 1969), soit :

*sur blé*, 18 m², avec analyse des composantes du rendement sur un emplacement délimité à la levée, mensuration de la hauteur à partir de l'épiaison, notation d'aspect ;

*sur maïs*, 16 m², comptage à la levée, notation d'aspects, composantes du rendement à la récolte.

TABLEAU I

*Traitements culturaux durant la phase de mesure*

| Numéro des traitements | Date de retournement (1) | Apport d'azote (kg/ha) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Au retournement (2) | Au semis de la culture | Total |
| 1 | Juin (après deux coupes) | 0 | 0 | 0 |
| 2 | | 0 | 50 | 50 |
| 3 | | 50 | 0 | 50 |
| 4 | | 50 | 50 | 100 |
| 5 | Fin août (après quatre coupes) | 0 | 0 | 0 |
| 6 | | 0 | 50 | 50 |
| 7 | | 50 | 0 | 50 |
| 8 | | 50 | 50 | 100 |

(1) *Modalités* : *a*) Un premier passage de rotovator, à 5 cm, rapide, avec carter baissé ; un deuxième passage à 10 cm, lent, carter relevé.

*b*) Labour de l'ensemble du dispositif début octobre.

(2) Cette dose correspond à celle que l'on juge suffisante pour un enfouissement de paille.

L'azote minéral a été dosé sur des échantillons moyens, prélevés tous les 15 jours, constitués par 5 à 10 carottes de terre et réalisés dans la couche 0-10 cm avant labour et dans la couche travaillée, après labour (0-15 cm jusqu'en mars, puis 0-20 cm). Le protocole de réalisation a été conçu de telle façon que la sixième répétition du dispositif recevait les traitements de fertilisation et les façons de mise en culture, comme les autres, mais ne portait pas de culture-test, ce qui a permis d'obtenir des données sur les effets du non-ensemencement.

En 1967, on a semé un blé derrière le maïs et un maïs derrière le blé. Ces mêmes cultures ont été également implantées sur la répétition laissée en sol nu. Elles reçurent 70 kg/ha d'azote.

### 4. *Conduite de l'expérimentation*

Au cours de la phase préparatoire, d'une durée de quatre ans et demi, la persistance du Dactyle a été très bonne. Par contre, la disparition du Trèfle blanc, au cours de l'année 1963, malgré son établissement correct au départ, est un facteur qui peut avoir eu une répercussion importante sur la fertilité en général. Ce manque de pérennité ne peut être attribué ni aux doses d'azote, ni à une mauvaise exploitation de l'herbe. Aucune autre remarque particulière n'est à faire concernant cette période.

Pendant la phase de mesure, comme pour les autres expériences, les opérations culturales (préparation, semis, entretien) ont été réalisées avec du matériel et dans des conditions identiques à ceux d'une ferme, selon le calendrier de l'annexe 1. Ne figurent que les interventions pouvant être en relation avec la minéralisation.

## III. — RÉSULTATS

### 1. *Phase préparatoire*

La prairie semée le 20-3-1962, après une phase de levée normale, s'établit régulièrement et, un an plus tard (5-3-1963), la végétation correspondait à un peuplement de 543 plants/m² se répartissant en 58,8 p. 100 de Dactyle « Prairial » et 41,2 p. 100 de Trèfle Ladino. Les productions de matière sèche et exportations d'azote durant cette phase figurent au tableau 2.

En 1963, année très pluvieuse, la répartition des constituants (séparés à chaque exploitation) (tabl. 3) correspond à un très bon équilibre.

Ceci ne s'est malheureusement pas reproduit en 1964, puisqu'une notation visuelle, au moment de chaque coupe, permettait d'estimer la participation de la graminée à 95 p. 100 en première et deuxième coupe et 100 p. 100 en troisième et quatrième ; ce qui revient à dire que seul le Dactyle a pris part au rendement annuel. Il en a été de même pour les années suivantes. Cette disparition du Trèfle blanc, très souvent observée dans les conditions de Lusignan, peut être attribuée aux condi-

TABLEAU 2

*Productions de matière sèche* (t/ha) *et exportations d'azote* (kg/ha) *durant la phase préparatoire* (1)

| Traitements | Production de M. S. | | | | | Exportations totales d'azote | Apports d'azote | Bilan |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1963 | 1964 | 1965 | 1966 | Total | | | |
| 1-2-3-4 ..... | 11,25 | 6,02 | 7,55 | 3,81 | 28,63 | 606,25 | 460 | — 150 |
| 5-6-7-8 ..... | 11,25 | 6,02 | 7,55 | 5,95 | 30,77 | 645,95 | 480 | — 170 |

(1) En 1962, année d'implantation, il n'a été pratiqué que deux coupes de nettoyage non pesées, par suite des conditions climatiques.

TABLEAU 3

*Composition de la végétation* (en pourcentage) *sur la base de la matière sèche*

| Espèces | Coupes | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Graminée ..... | 58,5 | 58,0 | 49,0 | 65,6 |
| Légumineuse ..... | 41,5 | 42,0 | 51,0 | 34,4 |

tions climatiques défavorables de l'hiver 1963-1964, suivies d'une forte sécheresse au cours de l'été 1964, accompagnée d'une attaque sévère de campagnols.

La différence de production entre les deux groupes de traitements provient, évidemment, du fait que les traitements 5 à 8 ont subi deux coupes supplémentaires par rapport aux autres, par suite du décalage des dates de retournement.

### 2. *Phase d'évaluation*

Nous envisagerons successivement les deux cultures-tests. Pour chacune d'elles, les rendements totaux en MS, les composantes du rendement et mensurations de la hauteur, les exportations d'azote figurent dans les tableaux inclus dans le texte (1) ; ces tableaux comportent d'une manière générale trois parties :

*a*) interaction azote × date de retournement (juin ou août),

*b*) effet azote (dates de retournement confondues),

*c*) effet date (doses d'azote confondues).

a) *Résultats de la culture-test du blé* (1967) — *Rendements* (tabl. 4).

L'analyse statistique des rendements, si l'on considère « globalement » le facteur « azote » sans différencier les apports au retournement de ceux au semis, c'est-à-dire si l'on considère qu'il y a quatre niveaux (donc 3 degrés de liberté) :

| | Doses d'azote (kg/ha) | |
|---|---|---|
| Niveaux | Semis | Retournement |
| — | — | — |
| 1 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 50 |
| 3 | 50 | 0 |
| 4 | 50 | 50 |

peut se résumer ainsi :

| Variables | Degrés de liberté | F calculé | | | F table (0,05) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Grain | Paille | Total | |
| Blocs ..... | 4 | NS | 2,72 | NS | 2,71 |
| Azote (N) ..... | 3 | 23,57 | 28,27 | 29,15 | 2,95 |
| Date (D) ..... | 1 | 5,57 | 30,41 | 19,13 | 4,20 |
| N × D ..... | 3 | 1,30 | 1,42 | 1,52 | 2,95 |
| Coefficient de variation (%) ..... | | 9,6 | 10,5 | 9,6 | |
| P.p.d.s. 5 % { N (dates confondues). | | 2,83 (q/ha) | 0,372 (t/ha) | 0,622 (t/ha) | |
| P.p.d.s. 5 % { D (azotes confondus). | | 2,05 | 0,261 | 0,444 | |

Sur la base du rendement total en matière sèche du *blé*, les deux traitements principaux ont une action très significative. L' « apport d'azote », considéré globalement (sans différencier retournement et semis) agit de façon prépondérante ; mais

(1) Le tableau concernant les exportations d'azote du maïs a été reporté en Annexe.

TABLEAU 4

*Rendement en blé*

| Traitements | Apport d'azote (1) | | Rendement en grain à 85 % de M. S. (q/ha) | Rendement (t/ha M. S.) | | | Rapport grain / paille | Répartition de la masse végétale (%) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | R | S | | Grain | Paille | Total | | Grain | Paille |
| 1 Retournement de juin | 0 | 0 | 36,72 | 3,123 | 3,715 | 6,838 | 0,840 | 45,7 | 54,3 |
| 2 Retournement de juin | 0 | 50 | 45,24 | 3,847 | 4,938 | 8,785 | 0,779 | 43,8 | 56,2 |
| 3 Retournement de juin | 50 | 0 | 33,81 | 2,875 | 3,331 | 6,206 | 0,863 | 46,3 | 53,7 |
| 4 Retournement de juin | 50 | 50 | 44,44 | 3,779 | 5,008 | 8,787 | 0,754 | 43,0 | 57,0 |
| 5 Retournement d'août | 0 | 0 | 30,37 | 2,583 | 2,974 | 5,557 | 0,868 | 46,5 | 53,5 |
| 6 Retournement d'août | 0 | 50 | 41,72 | 3,548 | 3,876 | 7,424 | 0,915 | 47,8 | 52,2 |
| 7 Retournement d'août | 50 | 0 | 33,57 | 2,855 | 3,120 | 5,975 | 0,915 | 47,8 | 52,2 |
| 8 Retournement d'août | 50 | 50 | 43,25 | 3,678 | 4,125 | 7,803 | 0,891 | 47,1 | 52,0 |
| P.p.d.s. (0,05) ..... | | | | | NS | | | | |
| *Effet de l'azote* | | | | | | | | | |
| 1-5 ..... | 0 | 0 | 33,55 | 2,853 | 3,341 | 6,194 | 0,853 | 46,0 | 54,0 |
| 2-6 ..... | 0 | 50 | 43,47 | 3,697 | 4,403 | 8,100 | 0,839 | 45,6 | 54,4 |
| 3-7 ..... | 50 | 0 | 33,69 | 2,865 | 3,223 | 6,088 | 0,888 | 47,0 | 53,0 |
| 4-8 ..... | 50 | 50 | 43,85 | 3,729 | 4,562 | 8,291 | 0,817 | 45,0 | 55,0 |
| P.p.d.s. (0,05) ..... | | | 3,32 | 0,283 | 0,372 | 0,622 | NS | | |
| *Effet des dates de retournement* | | | | | | | | | |
| Juin ..... | | | 40,07 | 3,408 | 4,247 | 7,655 | 0,802 | 44,5 | 55,5 |
| Août ..... | | | 37,28 | 3,170 | 3,523 | 6,699 | 0,900 | 47,4 | 52,6 |
| P.p.d.s. (0,05) ..... | | | 2,41 | 0,205 | 0,261 | 0,444 | 0,023 | | |

(1) R = Retournement ; S = Semis.

le traitement « date de retournement » a un effet marqué sur le rendement en paille, équivalent à l'effet de l' « azote ».

Il est possible de pousser plus loin l'analyse de variance en séparant l'effet « azote » en deux composantes : l'une attribuée à l'apport au retournement, l'autre à l'apport au semis. On obtient alors, pour le rendement grain + paille, l'analyse de variance ci-dessous (tous les effets simples ou interactions non significatifs au point 20 p. 100 étant inclus dans l'erreur) :

| Variables | Somme des carrés | Degrés de liberté | Carrés moyens | F calculé | Probabilité |
|---|---|---|---|---|---|
| Total ..... | 2 242 542 | 39 | | | |
| Date..... | 301 543 | 1 | 301 543 | 20,51 | < 0,1 % |
| N semis..... | 1 370 850 | 1 | 1 370 850 | 93,25 | < 0,1 % |
| D × N retournement .... | 41 280 | 1 | 41 80 | 2,81 | 10 % < P < 20 % |
| Résiduelle ..... | 528 869 | 36 | 14 690 | C. V. = 9,4 % | |

L'effet « date de retournement » *sur le rendement total* est net : juin (7,65 t de MS) > août (6,69) ; mais l'influence majeure est due à « l'apport d'azote au semis » : 50 (8,19) > 0 (6,14). Il existe une certaine interaction « date × azote au retournement » : l'apport de 50 unités d'azote sur le retournement d'août a un léger effet positif (+ 0,40 t de MS) ; le même apport, après l'intervention de juin, a un faible effet négatif (— 0,32) ; cependant, on a une chance sur cinq de se tromper dans l'appréciation de cet effet. Par contre, l'effet de l'azote apporté au semis est indépendant aussi bien de la date de retournement que de l'apport ou non d'azote au retournement. Il est assez remarquable de constater qu'il n'y a pas d'effet de la dose globale d'azote si l'on compare 50 + 50 à 0 + 50.

A la suite du travail de juin, *le rapport grain/paille* (0,80) est inférieur à la valeur trouvée pour l'intervention d'août, la participation de ces deux composantes au

TABLEAU 5

*Effet comparé de l'apport de 50 unités d'azote au semis sur le rapport grain/paille*

| Dose d'azote au semis (kg/ha) | Date de retournement | | |
|---|---|---|---|
| | Juin | Août | $\bar{x}$ dose |
| 0 | 0,851 | 0,891 | 0,871 |
| 50 | 0,766 | 0,903 | 0,844 |
| $\bar{x}$ date | 0,808 | 0,897 | |
| Ppds | 0,065 | NS | |

rendement est donc différente dans les deux cas. L'effet principal étant entraîné par l'apport ou non d'azote au semis, on peut regrouper les traitements 0-0 et 50-0, d'une part, 0-50 et 50-50, d'autre part. Alors qu'en août, les fluctuations ainsi constatées sur le rapport grain/paille sont faibles (0,89 et 0,90 respectivement), après retournement de juin, les rapports sont différents (0,85 et 0,76 respectivement) (tabl. 5).

L'effet marqué d'un apport de 50 unités d'azote au semis, sur le niveau des *rendements*, intervient donc principalement par un accroissement de la *production en paille* et on peut penser que la fourniture d'azote fut plus importante à la suite de l'apport sur retournement de juin par rapport à celle sur retournement d'août. Or, ceci ne se retrouve pas au niveau du bilan azote exporté-azote des apports (tabl. 6) :

TABLEAU 6

*Exportation d'azote par le blé*

| Traitements | Apport d'azote (1) | | Exportations (kg/ha N) | | | Teneur en azote (en %) | | Exportations — Apports (kgN/ha) (2) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | R | S | Grain | Paille | Total | Grain | Paille | |
| 1 Retournement de juin | 0 | 0 | 52,47 | 9,64 | 61,11 | 1,68 | 0,26 | + 62 |
| 2 | 0 | 50 | 66,65 | 11,34 | 77,89 | 1,73 | 0,23 | + 28 |
| 3 | 50 | 0 | 49,73 | 9,65 | 59,39 | 1,73 | 0,29 | + 9 |
| 4 | 50 | 50 | 63,11 | 13,00 | 76,11 | 1,67 | 0,26 | + 24 |
| 5 Retournement d'août | 0 | 0 | 46,45 | 8,02 | 53,47 | 1,76 | 0,27 | + 53 |
| 6 | 0 | 50 | 62,10 | 9,29 | 71,39 | 1,75 | 0,24 | + 21 |
| 7 | 50 | 0 | 50,24 | 8,42 | 58,66 | 1,76 | 0,27 | + 9 |
| 8 | 50 | 50 | 64,00 | 10,30 | 74,30 | 1,74 | 0,25 | — 26 |
| Ppds ..... | | | NS | NS | NS | | | |
| *Effet de l'azote* | | | | | | | | |
| 1-5 ..... | 0 | 0 | 48,96 | 8,83 | 57,79 | 1,72 | 0,26 | + 58 |
| 2-6 ..... | 0 | 50 | 64,32 | 10,31 | 74,63 | 1,74 | 0,23 | + 25 |
| 3-7 ..... | 50 | 0 | 49,98 | 9,03 | 59,01 | 1,75 | 0,28 | + 9 |
| 4-8 ..... | 50 | 50 | 63,55 | 11,65 | 75,20 | 1,70 | 0,25 | — 25 |
| Ppds ..... | | | 4,81 | 0,90 | 5,44 | | | |
| *Effet des dates de retournement* | | | | | | | | |
| Juin ..... | | | 57,96 | 10,90 | 68,86 | 1,70 | 0,26 | + 19 |
| Août ..... | | | 55,44 | 9,00 | 64,44 | 1,75 | 0,26 | + 19 |
| Ppds ..... | | | NS | 0,69 | 4,20 | | | |

(1) R = Retournement ; S = Semis.

(2) Cette différence estime l'azote issu de la minéralisation pour les seuls traitements 1 et 5. Pour les autres, c'est une appréciation du bilan de l'azote dans l'hypothèse d'une efficacité totale de l'engrais.

*Bilan de l'azote*

| | | Apport d'azote au semis | |
|---|---|---|---|
| | | 0 | 50 |
| Retournement | juin | + 61 | + 27 |
| | août | + 56 | + 23 |

TABLEAU 7

*Comparaison des mensurations de hauteur* (cm)
5/6 = épiaison
22/6 = hauteur définitive

| Dates | Traitements | | | | | | | | Ppds |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| | Retournement de juin | | | | Retournement d'août | | | | |
| | 0-0 | 0-50 | 50-0 | 50-50 | 0-0 | 0-50 | 50-0 | 50-50 | |
| 5/6 | 82,0 | 89,8 | 82,8 | 90,6 | 76,4 | 85,8 | 78,4 | 86,6 | NS |
| 22/6 | 96,0 | 102,4 | 95,6 | 101,0 | 90,6 | 99,2 | 91,2 | 99,6 | NC* |
| Différences | 14,0 | 12,6 | 12,8 | 10,4 | 14,2 | 13,4 | 12,8 | 13,0 | |

*Effet de l'azote*

| Dates | Traitements | | | | Ppds |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1-5<br>0-0 | 2-6<br>0-50 | 3-7<br>50-0 | 4-8<br>50-50 | |
| 5/6 | 79,2 | 87,8 | 80,6 | 88,6 | 2,45 |
| 22/6 | 93,3 | 100,8 | 93,4 | 100,3 | NC* |
| Différences | 14,1 | 13,0 | 12,8 | 11,7 | |

*Effet des dates de retournement*

| Juin | Août | Ppds |
|---|---|---|
| 86,3 | 81,8 | 1,74 |
| 98,7 | 95,1 | NC* |
| 12,4 | 13,3 | |

* NC : Non calculé

Il ne faut donc pas exclure l'hypothèse d'une meilleure efficacité de l'azote (exprimée en rendement en matière sèche) derrière retournement précoce.

De même, la comparaison des hauteurs à l'épiaison (tabl. 7) révèle un comportement différent à la suite des deux dates de retournement (+ 4,5 cm pour le retournement de juin).

On est donc amené à remarquer que, pour le retournement précoce :

1° *les rapports* grain/paille sont plus faibles (0,80), en moyenne, que ceux d'août (0,90) avec des *productions de grain* plus élevées, ce qui se traduit par une production plus importante de paille, partie de la plante plus sensible à l'azote que le grain et par des exportations d'azote correspondantes plus importantes :

*Interaction « date de retournement × azote au semis » au niveau de la paille*

| | | Rendement en M. S. (t/ha) | | Exportations d'azote (kg/ha) | |
|---|---|---|---|---|---|
| N au semis | | 0 | 50 | 0 | 50 |
| Date de retournement | juin | 3,523 | 4,973 | 9,6 | 12,2 |
| | août | 3,047 | 4,000 | 8,2 | 9,8 |

Ceci laisse supposer une malnutrition ultérieure à l'expression du potentiel « grain », sur le travail d'août ;

2° les 50 unités apportées au semis, augmentent la *production totale de matière sèche*, par le biais d'une meilleure alimentation en azote (sans que l'on puisse déterminer la part due à la minéralisation), laquelle se répercute sous forme de fabrication de paille (le rapport grain/paille est alors le plus faible constaté : 0,76) et ceci, toujours sans relation avec les 50 unités mises au retournement.

Ces faits sont à rapprocher de la fourniture globale d'azote par le sol (tabl. 6) laquelle est variable et traduit une forte interaction entre les doses d'apport d'engrais :

*Bilan de l'azote*

| | | N semis | |
|---|---|---|---|
| | | 0 | 50 |
| N retournement | 0 | 57 | 24 |
| | 50 | 9 | — 25 |

Quant au retournement d'août, d'une façon identique, l'azote apporté au semis est le seul facteur agissant sur l'accroissement des *rendements*. Cependant, pour les quatre traitements, les *rapports grain/paille* sont du même ordre (0,87 à 0,91), le plus faible correspondant aux parcelles sans aucun apport d'azote. Ceci ne correspond pas d'ailleurs à des fournitures de quantités identiques d'azote, dans toutes les

situations (tabl. 6). Dans une certaine mesure, le retournement tardif semble empêcher une disponibilité prolongée d'azote au printemps.

*Composantes du rendement* (tabl. 8)

Il n'y a pas eu d'échaudage et l'examen des facteurs du rendement montre nettement que le nombre d'épis au mètre linéaire est la variable explicative principale du rendement en grain dans cet essai. Cependant, une carence de l'alimentation azotée a dû se manifester durant la période hiver-début du printemps, et ce sur l'ensemble des traitements (les rendements en blé, la même année, ont varié de 40,6 à 41,9 q/ha de matière sèche dans un dispositif voisin). Le phénomène a été moins marqué sur les traitements ayant reçu de l'azote au semis. Il est très probable que ce

TABLEAU 8

*Composantes du rendement du blé*

| Traitements | | Apport d'azote (1) | | Par mètre linéaire | | Nombre d'épis /plante | Nombre de grains /épi | Poids de 1 000 grains |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | R | S | Nombre de plantes levées | Nombre d'épis | | | |
| 1 | Retournement de juin | 0 | 0 | 190 | 48,40 | 2,55 | 28,40 | 57,380 |
| 2 | | 0 | 50 | 180 | 54,80 | 3,04 | 27,77 | 57,360 |
| 3 | | 50 | 0 | 180 | 46,60 | 2,58 | 28,67 | 57,120 |
| 4 | | 50 | 50 | 200 | 55,20 | 2,76 | 29,43 | 57,130 |
| 5 | Retournement d'août | 0 | 0 | 200 | 43,20 | 2,16 | 27,35 | 56,820 |
| 6 | | 0 | 50 | 220 | 52,80 | 2,40 | 28,09 | 57,740 |
| 7 | | 50 | 0 | 230 | 48,20 | 2,09 | 25,62 | 57,180 |
| 8 | | 50 | 50 | 200 | 53,60 | 2,68 | 30,15 | 56,780 |
| Ppds (0,05) | | | | NS | NS | | NS | NC |
| *Effet de l'azote* | | | | | | | | |
| 1-5 | | 0 | 0 | 195 | 45,80 | 2,35 | 27,88 | 57,100 |
| 2-6 | | 0 | 50 | 200 | 53,80 | 2,72 | 27,93 | 57,550 |
| 3-7 | | 50 | 0 | 205 | 47,40 | 2,33 | 27,14 | 57,150 |
| 4-8 | | 50 | 50 | 200 | 54,40 | 2,62 | 29,79 | 56,940 |
| Ppds (0,05) | | | | NS | 5,88 | | NS | NC |
| *Effet des dates de retournement* | | | | | | | | |
| Juin | | | | 187 | 51,25 | 2,73 | 28,57 | 57,240 |
| Août | | | | 212 | 49,45 | 2,33 | 27,80 | 57,130 |
| Ppds (0,05) | | | | 23 | NS | | NS | NC |

(1) R = Retournement ; S = Semis.

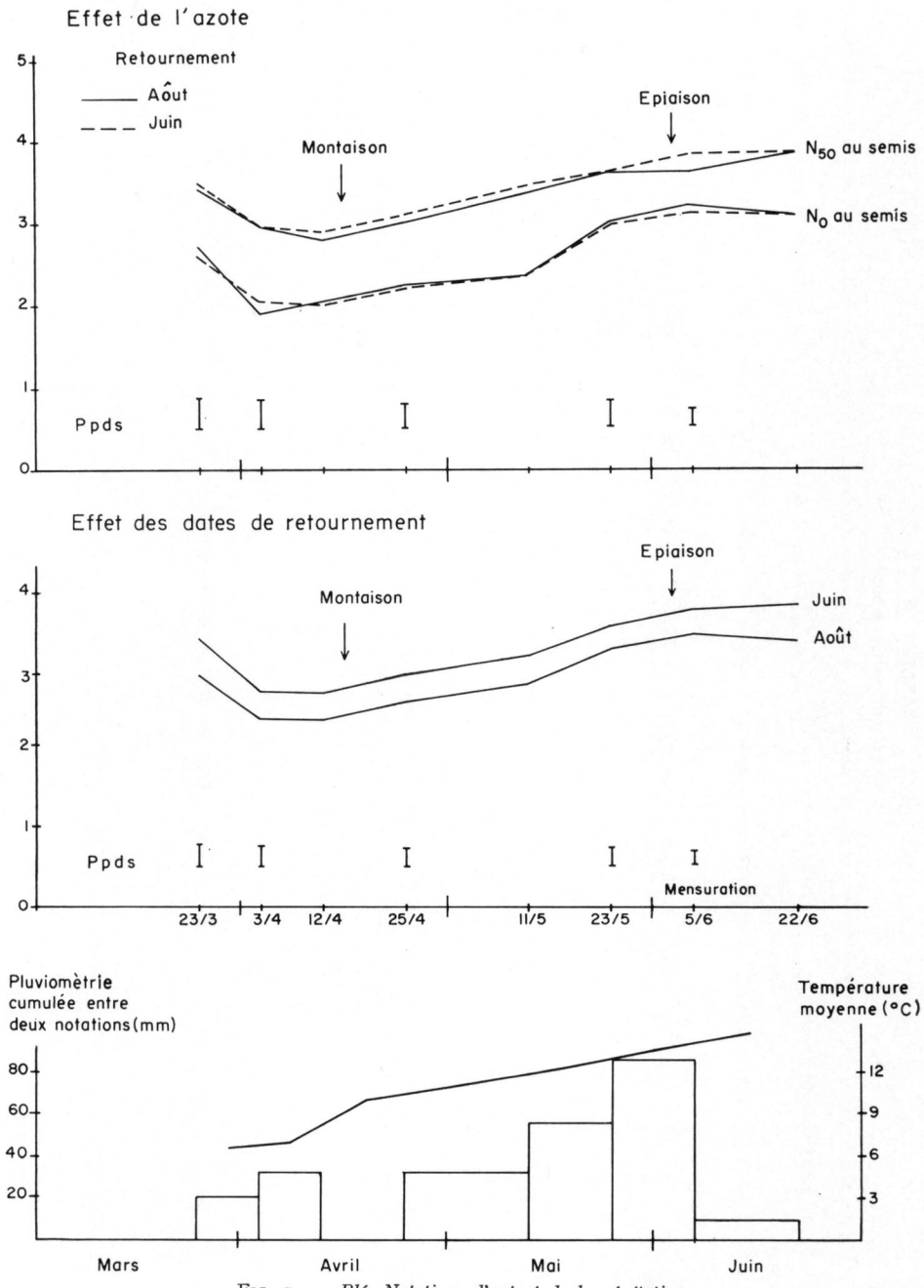



FIG. 1. — *Blé. Notations d'aspect de la végétation*

TABLEAU 9

*Rendements en maïs*

| Traitements | Apport d'azote (1) R | Apport d'azote (1) S | Nombre d'épis/plante | Rdts en grain à 85 % de M. S. (t/ha) | Rendement (t/ha M. S.) grain | paille | rafles | total | Répartition de la masse végétale grain | paille | rafles | Rapport grain/paille |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 Retournement de juin | 0 | 0 | 0,879 | 57,38 | 4,880 | 4,862 | 1,036 | 10,778 | 45,3 | 45,1 | 9,6 | 1,000 |
| 2 Retournement de juin | 0 | 50 | 0,899 | 55,81 | 4,746 | 5,062 | 1,162 | 10,970 | 43,3 | 46,1 | 10,6 | 0,937 |
| 3 Retournement de juin | 50 | 0 | 0,910 | 63,34 | 5,386 | 4,950 | 1,237 | 11,573 | 46,5 | 42,8 | 10,7 | 1,088 |
| 4 Retournement de juin | 50 | 50 | 0,909 | 53,19 | 4,523 | 5,062 | 1,165 | 10,750 | 42,0 | 47,0 | 11,0 | 0,893 |
| 5 Retournement d'août | 0 | 0 | 0,888 | 57,57 | 4,896 | 5,087 | 1,146 | 11,129 | 44,0 | 45,7 | 10,3 | 0,96 |
| 6 Retournement d'août | 0 | 50 | 0,880 | 51,93 | 4,416 | 5,000 | 1,131 | 10,552 | 41,8 | 47,3 | 10,9 | 0,883 |
| 7 Retournement d'août | 50 | 0 | 0,912 | 53,92 | 4,585 | 5,050 | 1,168 | 10,803 | 42,4 | 46,7 | 10,9 | 0,907 |
| 8 Retournement d'août | 50 | 50 | 0,912 | 55,51 | 4,721 | 5,500 | 1,181 | 11,402 | 41,4 | 48,2 | 10,4 | 0,858 |
| P.p.d.s. (0,05) | | | NS | NS | NS | NS | NC | NS | | | | |
| *Effet de l'azote* | | | | | | | | | | | | |
| 1-5 | 0 | 0 | 0,884 | 57,48 | 4,888 | 4,975 | 1,091 | 10,954 | 44,6 | 45,4 | 10,0 | 0,982 |
| 2-6 | 0 | 50 | 0,890 | 53,87 | 4,581 | 5,031 | 1,149 | 10,761 | 42,6 | 46,7 | 10,7 | 0,910 |
| 3-7 | 50 | 0 | 0,915 | 58,62 | 4,985 | 5,000 | 1,203 | 11,188 | 44,5 | 44,7 | 10,8 | 0,997 |
| 4-8 | 50 | 50 | 0,911 | 54,35 | 4,622 | 5,281 | 1,173 | 11,076 | 41,7 | 47,7 | 10,6 | 0,875 |
| P.p.d.s. (0,05) | | | NS | NS | NS | NS | NC | NS | | | | |
| *Effet des dates de retournement* | | | | | | | | | | | | |
| Juin | | | 0,901 | 57,43 | 4,884 | 4,984 | 1,150 | 11,018 | 44,3 | 45,2 | 10,5 | 0,979 |
| Août | | | 0,900 | 54,73 | 4,654 | 5,519 | 1,158 | 10,971 | 42,4 | 47,0 | 10,6 | 0,902 |
| P.p.d.s. (0,05) | | | NS | NS | NS | NS | NC | NS | | | | |

(1) R = Retournement ; S = Semis

dernier, apporté dans la période de repos des microorganismes, a été utilisé en partie par les plantes alors que celui apporté au retournement s'est trouvé bloqué, donc momentanément inutilisable.

*Notations d'aspect de la végétation* (fig. 1)

Bien avant de connaître le niveau du rendement final, l'aspect noté dès le début du printemps (23-3), puis durant toute la phase végétative préfigurait la réponse exacte de chaque traitement. Ainsi, la courbe du « retournement de juin » s'est toujours trouvée au-dessus de celle « d'août » manifestant un comportement différent suivant les dates d'intervention. On peut remarquer que l'augmentation des notes est liée à celle de la température. L'action de l'azote, dates de retournement confondues, révèle une différence très marquée pour les apports au semis comparés aux autres traitements, ce qui se traduit, en fin de compte, à la récolte, par des épis plus nombreux (tabl. 8).

TABLEAU 10

*Composantes du rendement du maïs*

| Traitements | Apport d'azote (1) | | Nombre d'épis par ha | Longueur moyenne d'un épi | Poids de 1 000 grains (à 85 % de M. S.) | Nombre de grains/épi |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | R | S | | | | |
| 1 Retournement de juin | 0 | 0 | 55,500 | 16,2 | 327,2 | 316 |
| 2 Retournement de juin | 0 | 50 | 56,750 | 16,1 | 323,0 | 304 |
| 3 Retournement de juin | 50 | 0 | 58,000 | 16,3 | 345,7 | 313 |
| 4 Retournement de juin | 50 | 50 | 56,370 | 16,3 | 318,9 | 296 |
| 5 Retournement d'août | 0 | 0 | 56,250 | 16,0 | 342,2 | 300 |
| 6 Retournement d'août | 0 | 50 | 55,500 | 16,0 | 326,3 | 287 |
| 7 Retournement d'août | 50 | 0 | 57,500 | 16,0 | 323,1 | 286 |
| 8 Retournement d'août | 50 | 50 | 57,500 | 16,3 | 330,4 | 292 |
| P.p.d.s. (0,05) | | | NS | NC | NC | |
| *Effet de l'azote* | | | | | | |
| 1-5 | 0 | 0 | 55,870 | 16,1 | 334,7 | 308 |
| 2-6 | 0 | 50 | 56,130 | 16,1 | 324,6 | 296 |
| 3-7 | 50 | 0 | 58,000 | 16,1 | 336,9 | 299 |
| 4-8 | 50 | 50 | 56,940 | 16,3 | 324,6 | 294 |
| P.p.d.s. | | | NS | NC | NC | |
| *Effet des dates de retournement* | | | | | | |
| Juin | | | 56,810 | 16,2 | 328,7 | 291 |
| Août | | | 56,680 | 16,1 | 331,7 | 296 |
| P.p.d.s. | | | NS | NC | NC | |

(1) R = Retournement ; S = Semis.

En résumé, dans les réactions de la culture de blé d'hiver, on retrouve ce phénomène constant d'une malnutrition azotée durant la période de « repos » du sol, période pendant laquelle l'apport d'engrais accroît les rendements.

b) *Résultats de la culture-test de maïs* (1967).

Contrairement à ceux obtenus sur blé, les rendements sont tous non significativement différents (tabl. 9), aux seuils courants de probabilité, résultat que l'on peut attribuer en grande partie aux conditions de l'année, le déficit hydrique important de l'été ayant limité, dans une certaine mesure, l'extériorisation des différences potentielles (pour les quatre mois de juin à septembre, la pluviométrie totale a été de 167 mm). Ce facteur « eau » a considérablement restreint la variation due aux facteurs contrôlés (azote : $P = 0{,}20$ ; date $= 0{,}10 < P < 0{,}20$).

Les composantes du rendement (tabl. 10) n'apportent pas d'éléments intéressants. De même, les notations d'aspect (fig. 2) ne permettent pas d'observer de différences visibles jusqu'à la récolte. Les courbes se superposent lorsque l'on compare les dates

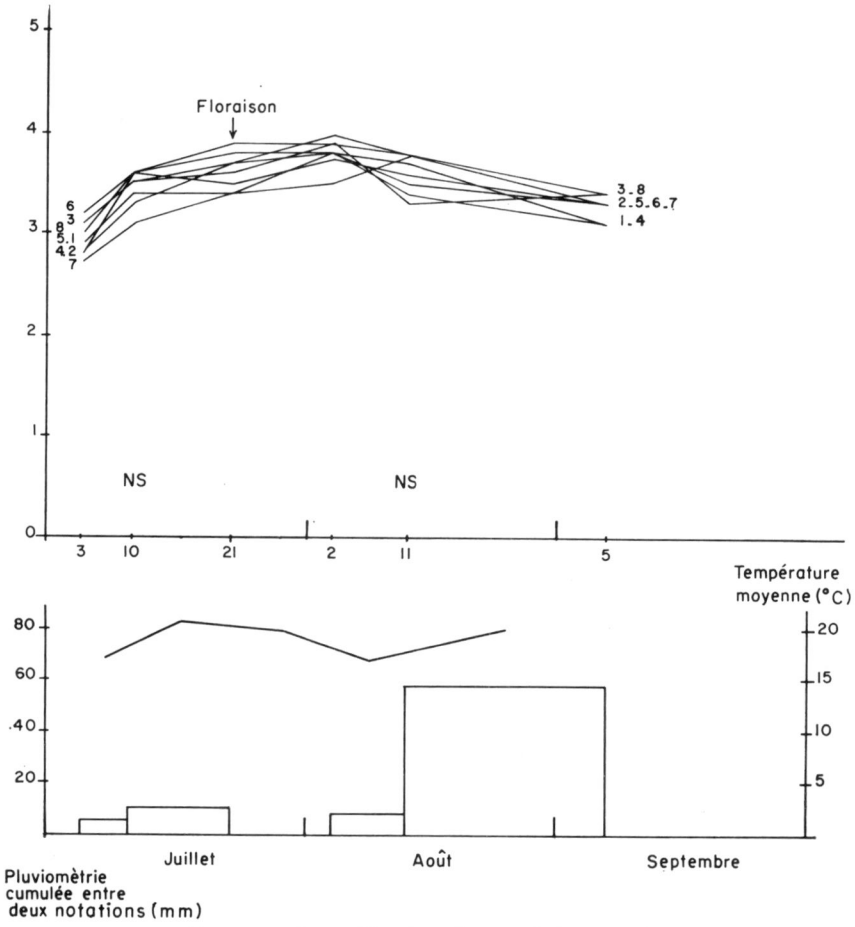



FIG. 2. — *Maïs. Notations d'aspect de la végétation*

de retournement et les apports d'azote, ce qui traduit bien, en définitive, les valeurs identiques de production globale de matière sèche.

Certaines tendances apparaissent dans la répartition de la masse végétale entre grain et paille ; mais il semble peu prudent d'en tirer des conclusions.

c) *Comparaison des deux cultures* (1967).

Comme l'indique la figure 3, seul le comportement du blé apparaît comme bien différencié, tous les maïs étant sensiblement identiques.

Pour faciliter la compréhension des résultats, le tableau II rassemble les bilans (augmentation ou diminution), en termes de matière sèche totale, en relation avec l'apport de 50 unités d'azote, soit au retournement, soit au semis, pour les deux cultures de blé et de maïs. L'examen de ce tableau montre que seules, des comparaisons globales peuvent être faites sur le blé. La première concerne l'effet important de l'apport de 50 unités au semis (augmentation moyenne du rendement de 2, 111 t/ha); la seconde est un effet pratiquement nul de l'azote apporté au retournement

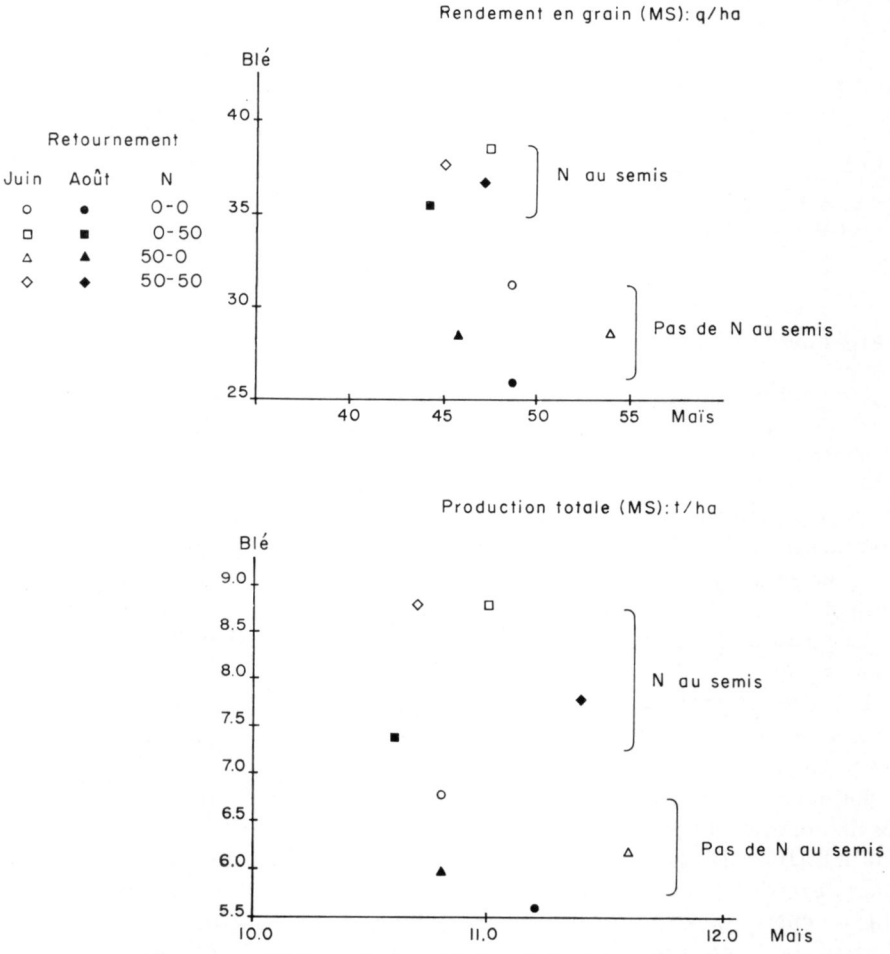



FIG. 3. — *Relation entre le comportement des deux cultures-tests*

(moyenne : + 0,041 t/ha). Sur maïs, les effets sont discordants et il est sage de penser que la sécheresse a nivelé les rendements et que les différences constatées ne reflètent que des fluctuations aléatoires.

TABLEAU II

*Effets calculés comparés des fumures azotées sur la production globale de matière sèche par le Blé et le Maïs* (t/ha)

| Traitements | | Blé | | | Maïs | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | t/ha | Effet | | t/ha | Effet | |
| | | | Azote au retournement | Azote au semis | | Azote au retournement | Azote au semis |
| 1 | 0-0 | 6,838 | | | 10,778 | | |
| 2 | 0-50 | 8,785 | | + 1,947 | 10,970 | | + 0,192 |
| 3 | 50-0 | 6,206 | — 0,632 | | 11,573 | + 0,795 | |
| 4 | 50-50 | 8,787 | + 0,002 | + 2,581 | 10,750 | — 0,220 | — 0,823 |
| 5 | 0-0 | 5,557 | | | 11,129 | | |
| 6 | 0-50 | 7,424 | | + 1,867 | 10,552 | | — 0,577 |
| 7 | 50-0 | 5,975 | + 0,418 | | 10,803 | — 0,326 | |
| 8 | 50-50 | 7,803 | + 0,379 | + 1,828 | 11,402 | + 0,850 | + 0,599 |

Retournement d'août de juin

*Effet de l'azote au retournement* : 3–1 et 4–2 ; 7–5 et 8–6.
*Effet de l'azote au semis* : 2–1 et 4–3 ; 6–5 et 8–7.

d) *Évolution de l'azote minéral dans le sol* (1967).

L'évolution de l'azote minéral dans le sol nu est représentée graphiquement sur la figure 4, pour la période du 2 juin au 1er février et sur la figure 5 pour les prélèvements du 16 mars au 5 septembre (pour ces mêmes prélèvements, les résultats du dosage sont donnés dans l'Annexe 2).

Pour la première période, il apparaît une influence très nette des apports d'azote au retournement sur le comportement de cet élément. Par contre, l'apport au semis (28-11) ne se manifeste nullement. A première vue, il semble n'y avoir que peu de correspondance entre les différences relevées et les rendements de la culture-test de blé. La phase de réorganisation correspond avec la stabilisation de la teneur en eau du sol (fig. 6).

L'analyse statistique des valeurs mesurées à chaque date de prélèvement entre le 16 mars et le 5 septembre (tabl. 12) montre que le coefficient de variation est élevé (28,8 p. 100).

La quantité d'azote minéral présente dans le sol est évidemment fonction de la date de prélèvement ; mais ni l'azote apporté au semis, ni la date de retournement n'ont une action décelable sur le niveau moyen d'azote. Il existe une interaction entre la date de retournement et l'apport d'azote au même moment (cette dernière variable ayant un effet propre proche de la signification au seuil limite de 5 p. 100) : la minéralisation de l'azote est plus intense après retournement d'août recevant 50 unités

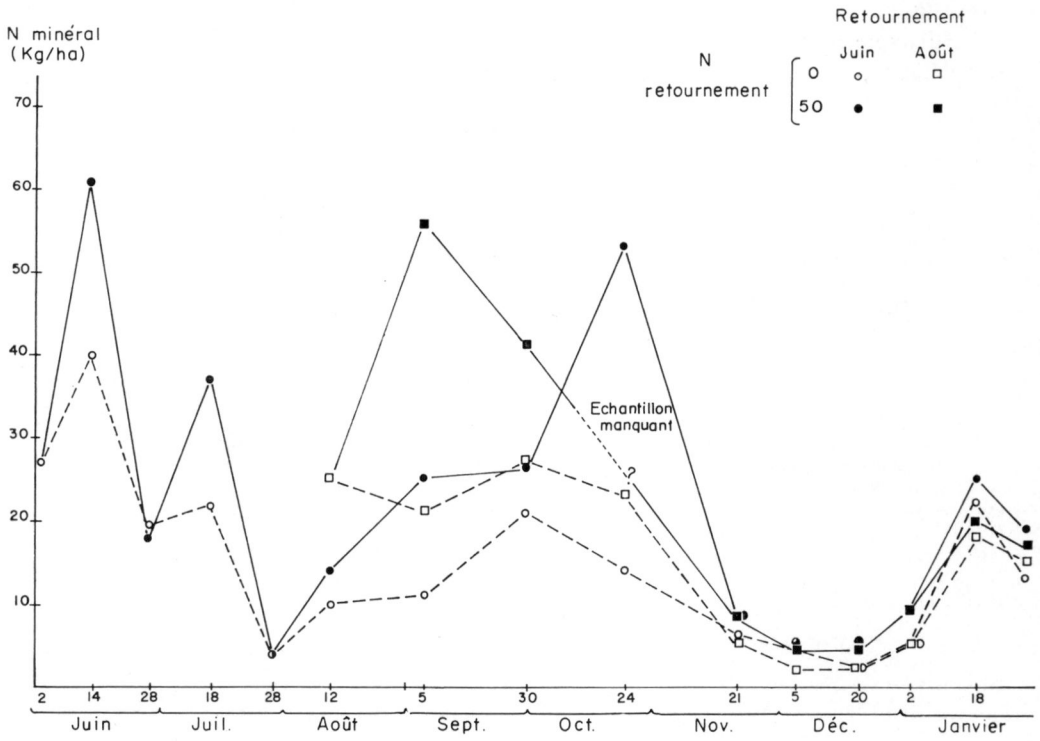



FIG. 4. — *Évolution de l'azote minéral* (kg/ha) *après retournement d'une prairie de dactyle*

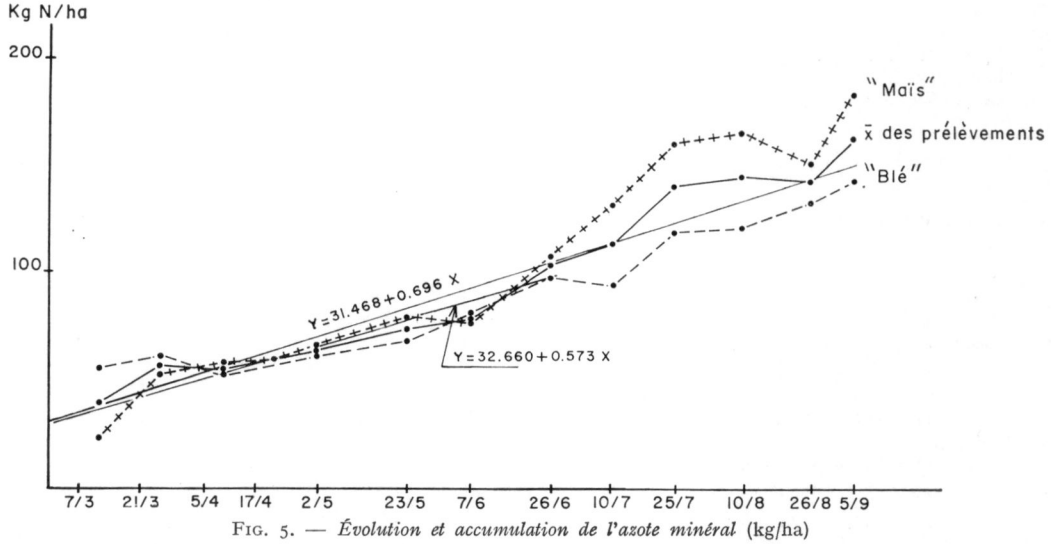



FIG. 5. — *Évolution et accumulation de l'azote minéral* (kg/ha)

d'azote (à partir du 25-7) et moins intense pour le même traitement après travail de juin (fig. 7).

Bien que la confrontation des résultats d'analyse avec les performances végétales soit délicate, ces effets d'interaction vont dans le même sens que ceux fournis par le

TABLEAU 12

*Évolution de l'azote minéral dans le sol*

a) *Analyse de la variance* (1)

| Origine de la variation | Somme des carrés | Degrés de liberté | Variance | F calculé | F théorique 5 % | F théorique 1 % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Totale | 533 274 | 207 | | | | |
| Dates de prélèvement (D) | 359 606 | 12 | 29 967 | *42,69* | 1,75 | |
| N au retournement ($N_R$) | 2 403 | 1 | 2 403 | 3,42 | 3,84 | |
| N au semis ($N_S$) | 934 | 1 | 934 | 1,33 | 3,84 | 2,71 |
| Culture (C) | 11 122 | 1 | 11 122 | *15,84* | 3,84 | |
| D × C | 19 194 | 12 | 1 599 | *2,28* | 1,75 | |
| $D_R \times N_R$ | 13 813 | 1 | 13 813 | *19,68* | 3,84 | |
| $N_S \times C$ | 1 867 | 1 | 1 867 | 2,66 | 3,84 | 2,71 |
| Résiduelle | 124 335 | (178-1) | 702 | | | |

b) *Analyse de la régression*

*Moyenne des prélèvements pour l'ensemble de la période d'étude*

| Origine de la variation | S. C. | D. L. | V. | $F_C$ | $F_t$ 5 % |
|---|---|---|---|---|---|
| Totale | 22 475 | | | | |
| Régression | 21 708 | 1 | 21 708 | 311,4 | 4,84 |
| Résiduelle | 767 | 11 | 69,7 | | |

*Moyenne des prélèvements pour la période du 7 mars au 26 juin*

| Origine de la variation | S. C. | D. L. | V. | $F_C$ | $F_t$ 5 % |
|---|---|---|---|---|---|
| Totale | 3 691 | | | | |
| Régression | 3 422 | 1 | 3 422 | 76,6 | 5,99 |
| Résiduelle | 269 | 6 | 44,8 | | |

(1) Ont été introduites dans la résiduelle les sommes des carrés correspondant aux effets et interaction non significatifs :

— Date de retournement ($D_R$),
— $D \times D_R$, $D_R \times C$,
— $D_R \times N_S$, $D_R \times C$,
— $N_R \times N_S$, $N_R \times C$.

rendement total en MS du blé (doses d'azote au semis confondues). Il n'est pas sans intérêt de noter que la plante « anticipe » sur le sol nu : en quelque sorte, la présence d'une végétation accélère la manifestation du phénomène (fig. 8).

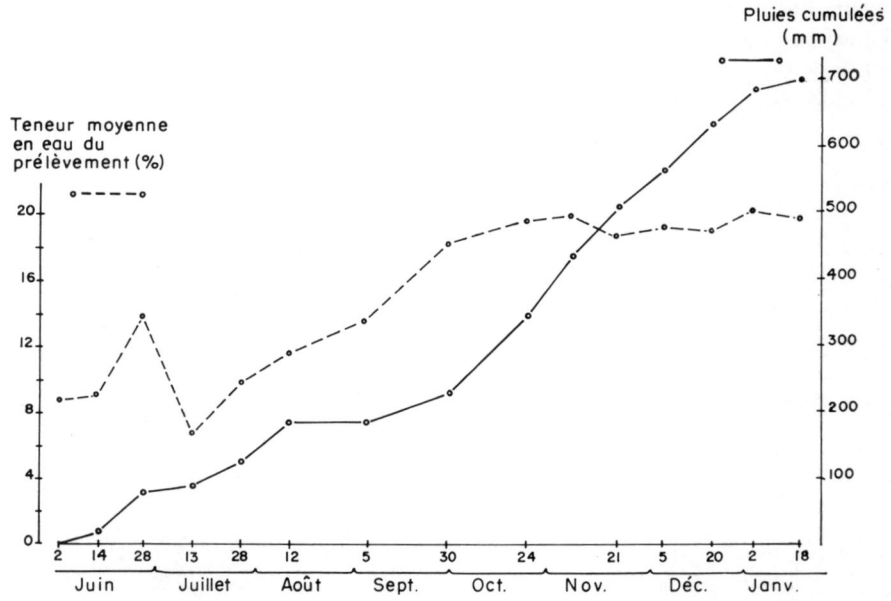



FIG. 6. — *Relation entre la pluviométrie et la teneur en eau des prélèvements*

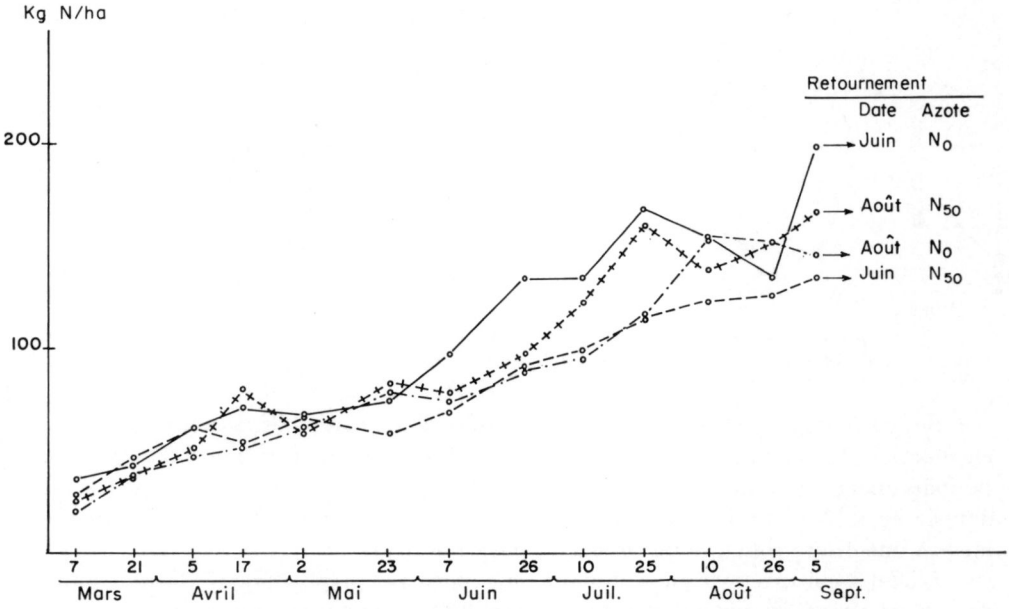



FIG. 7. — *Interaction date de retournement × apport d'azote au retournement : manifestation sur le niveau d'azote minéral*

D'autre part, il n'existe aucune liaison décelable statistiquement entre le rendement en grain du blé et les doses d'azote minéral mesurées à l'un quelconque des prélèvements dans le temps.

On constate un effet « culture » dû au travail du sol à une date convenable pour la culture (blé ou maïs), implantée sur les autres répétitions de l'essai. Il y a beaucoup plus d'azote dans les sols travaillés au printemps que dans ceux travaillés à l'automne, puis laissés en sol nu et correspondant respectivement à un pseudo-maïs et à un pseudo-blé. Sur la figure 5, on voit que la différenciation a eu lieu entre le 26-6 et le 10-7.

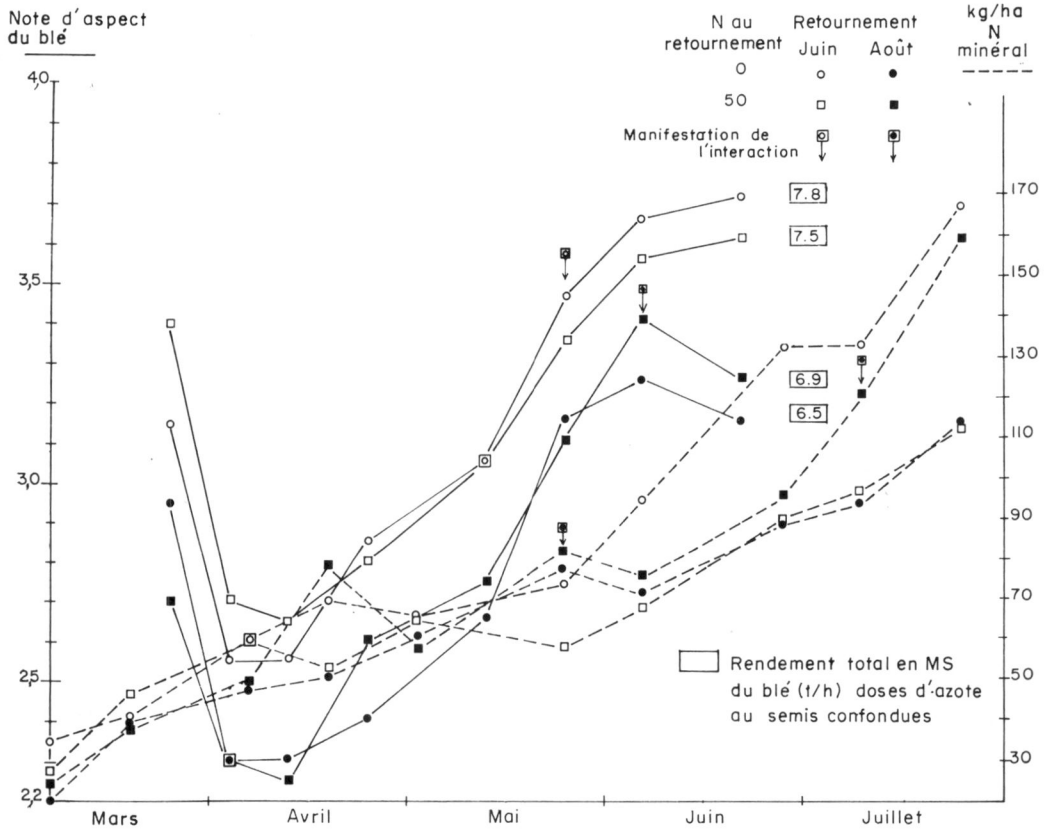



FIG. 8. — *Interaction date de retournement × apport d'azote au retournement: dynamique de sa manifestation sur le blé et sur l'azote minéral dans le sol nu*

Sur cette même figure 5, on a porté la droite de régression de la quantité d'azote en fonction du temps pour l'ensemble des prélèvements et la même droite pour la période allant du 7 mars au 26 juin. L'analyse statistique de ces régressions est donnée au tableau 12. Bien que les écarts à la régression augmentent en été, l'ajustement à une droite conserve une valeur explicative élevée.

L'effet « culture » est aussi la variable explicative prépondérante du maximum de teneur en azote minéral constaté (169,6 kg/ha dans les parcelles travaillées à l'automne contre 200,1 dans les parcelles « préparées » pour le maïs), en dehors des

dates de prélèvement. Ce maximum se manifeste plus tôt sur les parcelles travaillées au printemps. Il est également plus précoce sur les parcelles ayant reçu de l'azote au semis.

Le traitement correspondant au retournement du mois de juin avec apport de 50 unités d'azote se trouve très défavorisé par le fait qu'il y a eu une minéralisation importante en octobre (fig. 4).

Enfin, il existe une liaison entre la minéralisation aux mois de mai et juin et l'élévation de la température (fig. 9).

En ce qui concerne le blé, ce sont en fait les résultats culturaux qui permettent de rechercher, dans le comportement de l'azote, une explication. On peut alors faire les commentaires suivants :

Les « témoins » sans azote différencient nettement le comportement du blé, suivant la date de retournement du dactyle (tabl. 4) :

| Date du retournement | Rendement (t/ha de M. S.) | | N minéral (kg/ha) : 0-60 cm | |
|---|---|---|---|---|
| | Grain | Paille | 5/4 | 17/4 |
| Juin (J) ..... | 3,12 | 3,71 | 67 | 81 |
| Août (A) ..... | 2,58 | 2,97 | 44 | 47 |
| $\frac{J-A}{A}$ % ..... | + 20 % | + 25 % | | |

D'ailleurs, le profil des parcelles retournées en août contient, à la période de la montaison, une quantité d'azote minéral nettement inférieure à celle relevée dans les parcelles retournées en juin.

L'apport d'azote au retournement a amélioré la production du blé pour le traitement d'août mais a plutôt diminué celle sur retournement de juin (tabl. 4) :

| Date du retournement | Août | | Juin | |
|---|---|---|---|---|
| N | 0 | 50 | 50 | 0 |
| Rendement (t/ha de M. S.) | | | | |
| Grain ..... | 2,58 | 2,85 | 2,87 | 3,12 |
| Paille ..... | 2,97 | 3,12 | 3,33 | 3,71 |

L'azote a dû être apporté en quantités insuffisantes. En effet, alors que la préparation la plus précoce, sans engrais, était supérieure à la plus tardive, l'apport d'engrais en juin a permis un début de décomposition des résidus de la prairie mais

cette décomposition n'a pu être suffisante par manque d'azote. Cet effet se traduit par une teneur du sol inférieure dans la période « montaison-épiaison » (15-4/3-6) :

| N minéral (0-60 cm) kg/ha | 17-4 | 2-5 | 23-5 | 7-6 |
|---|---|---|---|---|
| Juin + 50 | 63 | *49* | *48* | 74 |
| Août + 50 | 60 | **78** | **93** | 84 |

Si l'on recherche dans l'azote présent dans le sol, au cours du temps, l'effet des apports de 50 unités au semis, on note des manifestations différentes, suivant les traitements :

| Date du retournement | Azote | | N minéral (0-60 cm) kg/ha | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | au retournement | au semis | 5-4 | 17-4 | 2-5 | 23-5 | 7-6 |
| Juin | 0 | 0 | 67 | 81 | 51 | 56 | 97 |
| | 0 | 50 | 55 | 60 | **74** | **81** | **108** |
| | 50 | 0 | 44 | 63 | 49 | 48 | 74 |
| | 50 | 50 | 59 | 64 | **80** | **80** | 64 |
| Août | 0 | 0 | 44 | 47 | 48 | 66 | 70 |
| | 0 | 50 | **72** | 45 | 64 | 54 | 70 |
| | 50 | 0 | 48 | 60 | 78 | 93 | 84 |
| | 50 | 50 | 36 | 40 | 39 | 58 | 72 |

Pour le retournement de juin, avec ou sans azote au labour de la prairie, l'apport au semis a augmenté la fourniture entre montaison et épiaison. Pour le retournement d'août, sans apport d'azote au labour, il y a une plus forte quantité d'azote juste avant la montaison, pour un apport au semis. Pour le même retournement, avec azote au labour, les différences dans les quantités sont en faveur des parties sans azote au semis : elles ne peuvent pas expliquer les résultats.

En définitive, sauf dans le dernier cas, tout laisse supposer une grande sensibilité du blé dans la période précédant juste la montaison, se poursuivant jusqu'à l'épiaison. Les rendements et les notations indiquent que, dans tous les cas, la fourniture devait être insuffisante.

e) *Résultats des cultures-tests en 1968.*

L'analyse statistique du rendement en grain du blé fait ressortir des effets significatifs des variables ci-après (fig. 10) :

— répétitions (P = 0,5 p. 100) : le rendement est notablement plus élevé (38,3 q/ha) sur le bloc laissé en sol nu en 1967, par rapport aux parcelles venant derrière maïs (31,4 q/ha) ;

— azote au retournement (P = 0,5 p. 100) : les rendements sont meilleurs en

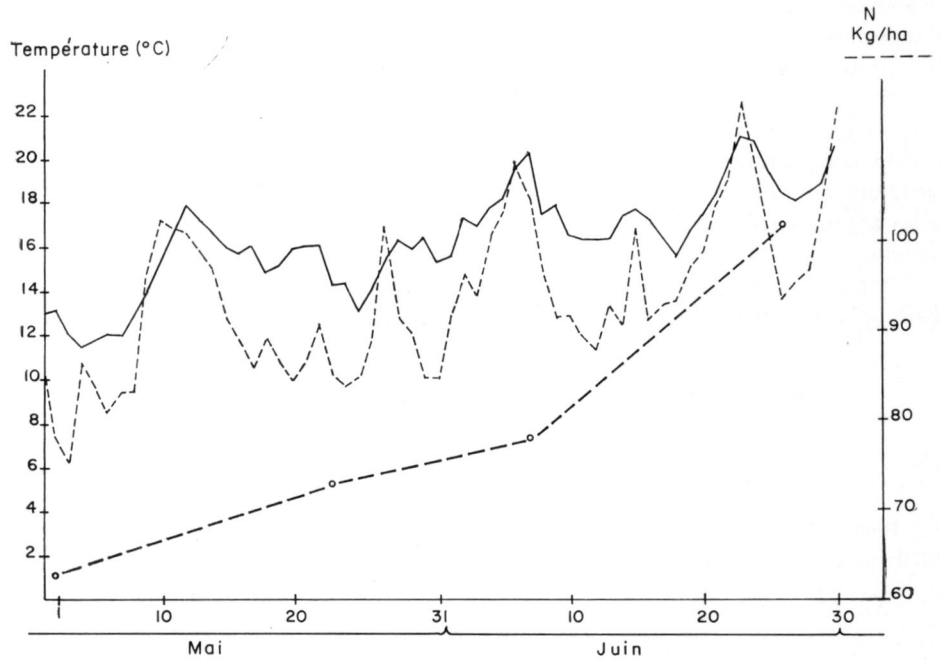



FIG. 9. — *Relation entre la minéralisation aux mois de mai et juin et l'élévation de la température*

——— Températures du sol à — 20 cm
------- Températures planimétrées à 2 m sous abri
– – – – N minéral kg/ha

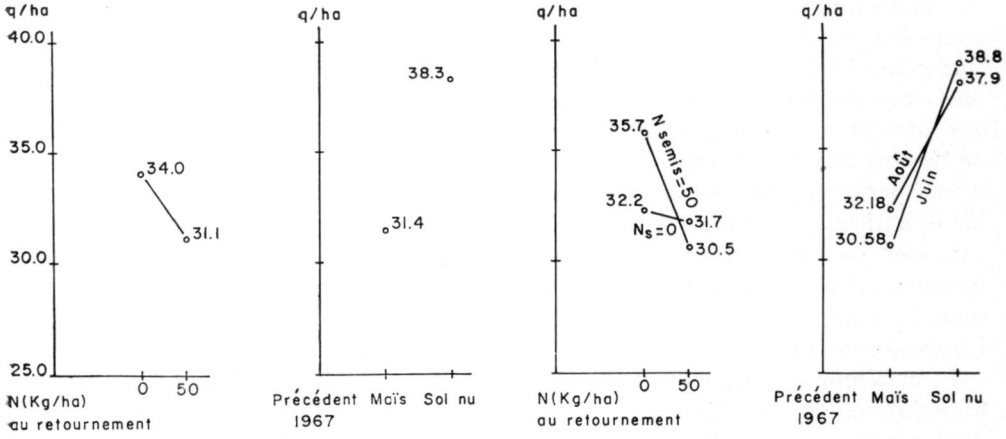



FIG. 10. — *Rendement en grain du blé en* 1968 (M. S. q/ha)

l'absence d'apport d'azote au retournement (34,0 contre 31,1 q/ha), et ceci est surtout net en présence d'un apport d'azote au semis sur la culture précédente, en l'occurrence un maïs (P de l'interaction = 1 p. 100). Tout se passe comme si l'absence d'apport d'azote au semis retardait le déroulement de la minéralisation, au profit de la deuxième culture.

Par contre, le rendement en grain du maïs ne varie qu'avec les répétitions : 49,0 q/ha derrière sol nu contre 51,5 derrière blé. L'effet « jachère » est donc ici inverse de celui constaté sur blé. Ces résultats sont à rapprocher de l'effet « culture » constaté sur le niveau maximum de teneur du sol en azote minéral : 200,1 kg/ha pour les parcelles ayant porté un blé en 1968 contre 169,6 pour celles ayant porté par la suite un maïs.

Par conséquent, après blé, le maïs n'extériorise plus aucun effet résiduel, compte tenu de la fourniture de 70 unités d'azote par les engrais.

## IV. — CONCLUSION

Il paraît difficile de conclure en envisageant l'ensemble des résultats des deux cultures, c'est pourquoi chacune d'elle est envisagée séparément.

### 1. *Blé*

L'accroissement de rendement sur un retournement précoce (2,8 q/ha en grain à 85 p. 100 de MS) est le résultat le plus intéressant et aussi le plus original du travail.

Cependant, il est évident que c'est surtout l'azote apporté au semis (28/11/1966) qui a marqué, entraînant, par exemple, une augmentation moyenne des exportations de 16,5 kg/ha, pour les 50 mis sur les traitements 2, 4, 6 et 8 (tabl. 6).

Cette fertilisation en période de ralentissement de l'activité microbienne a eu pour effet principal de mettre les plantes en conditions favorables à l'expression de leur potentiel de production. Ceci s'est traduit morphologiquement par un nombre plus élevé d'épis et, par voie de conséquences, par des besoins très supérieurs à ceux des autres traitements. Dès le printemps, au départ de la minéralisation, deux niveaux de besoins avaient ainsi été créés. Ceci a abouti, en fait, à deux niveaux différents d'offre par le sol. Dans cet essai, le comportement du blé fait apparaître que l'état de la végétation à un moment donné déclenche des processus conditionnant une fourniture plus ou moins importante d'azote, selon la demande. Étant donné la relation positive entre les augmentations des appareils aérien et radiculaire, l'azote présent sera d'autant mieux utilisé que cette masse radiculaire sera plus compétitive à l'égard des activités microbiennes.

En définitive, on peut dire que, pour un blé d'hiver, le flux d'azote dans le système (sol, plante), en période de minéralisation, dépend principalement des besoins de la culture, ce qui explique que le rendement final soit à la fois tributaire des conditions de départ et de l'alimentation pendant la période hiver-début de printemps. *En l'absence de plantes*, il en est tout autrement (cette situation se rencontrant pour les apports de 50 unités d'azote au retournement).

## 2. *Maïs*

Sans aucun doute, les conditions de l'année 1967, qui peut être considérée comme sèche, ont nivelé les rendements du maïs à un niveau pour lequel les traitements comparés deviennent d'une importance secondaire, bien que le rendement moyen de l'essai soit de 56 q/ha (à 85 p. 100 de MS). Les besoins les plus importants de cette culture, contrairement à ce qui se passe pour le blé, ne se situent pas dans la première phase de la végétation (toujours climatiquement favorisée à Lusignan), mais au moment de la floraison (notée le 21/7, ici).

L'influence d'un bilan hydrique déficitaire à ce stade ressort des données ci-dessous :

| Années | Bilan hydrique en fin juillet (mm) | Rendements en maïs (1) | |
|---|---|---|---|
| | | Grain à 85 % de M. S. (q/ha) | Plante entière (t/ha) |
| 1965 ..... | — 27,0 | 88,9 | 14,92 |
| 1968 ..... | — 34,0 | 83,3 | 14,36 |
| 1963 ..... | — 18,0 | 80,0 | 15,15 |
| 1966 ..... | + 38,0 | 69,9 | 13,13 |
| 1962 ..... | — 34,0 | 56,0 | — |
| 1967 ..... | — 76,0 | 41,7 | 8,77 |
| 1964 ..... | — 82,0 | 38,0 | 5,96 |

(1) Rendements en grain relevés sur une « unité d'exploitation » en vraie grandeur et rendements des plantes entières provenant d'une « micro-unité d'exploitation » conduite de façon identique (cf. JACQUARD et coll., 1969 *a* et *b*).

| Années | Déficit en fin de mois (mm) | | | Rendements en M. S. obtenus dans un autre essai sur un traitement de même niveau (essai nº 2, cf. JACQUARD et coll., 1970, tabl. 3). | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Juillet | Août | Septembre | Grain (q/ha) | Global (t/ha) |
| 1966 ..... | + 38 | + 12 | — 30 | 81,2 | 14,149 |
| 1965 ..... | — 27 | — 51 | + 85 | 78,5 | 13,828 |
| 1967 ..... | — 75 | — 117 | — 114 | 50,7 | 10,529 |

Il est logique de penser que, malgré des besoins différents au moment de la floraison, ceux-ci n'ont pu être satisfaits par suite de la sécheresse, facteur prépondérant de l'ensemble des habitats. Mais il est possible aussi qu'en première année après retournement de prairie, la minéralisation de la matière organique, en dehors de toute action bénéfique des apports d'azote, ait permis partout des rendements relativement bons, ce qui a d'ailleurs été déjà remarqué dans d'autres essais.

A nouveau, l'une des conclusions de cette expérience sera qu'il n'est pas possible d'utiliser une seule culture pour évaluer les réactions d'un sol, car le comportement

particulier de chaque plante peut, dans une certaine mesure, masquer les effets escomptés (ou entraîner une extériorisation différente) :

1° soit que des incidences climatiques importantes minimisent les possibilités d'expression potentielle du végétal ;

2° soit que son rythme végétatif propre ne soit pas en concordance de phase avec un effet à modulation saisonnière (telle que la minéralisation de l'azote, par exemple).

D'après les mesures d'azote minéral, la manifestation des apports dans ce cas particulier, par exemple, n'est apparue que d'une façon trop tardive pour le blé et dans une période où le maïs souffrait ou bien d'une insuffisance antérieure, ou bien d'un déficit hydrique.

Par rapport au problème général des effets résiduels, il faut faire les remarques suivantes :

1° les apports d'azote sur la prairie, bien qu'elle fusse composée d'un mélange graminée-légumineuse, étaient insuffisants pour couvrir les exportations. Il se pourrait que des doses plus importantes, en particulier avant les dernières coupes, puissent modifier les réactions ultérieures. Un essai de LEFÈVRE et HIROUX (1969), avec Ray-grass d'Italie le laisserait supposer : le rendement du blé suivant y étant sous la dépendance des fumures azotées fournies aux deux dernières pousses ;

2° en présence du déficit en azote ainsi mesuré après la prairie, il est évident que la *fourniture fut insuffisante*. C'est là une conclusion importante. Les apports compensateurs d'azote, mis au retournement et au semis, ont été trop faibles, puisque en définitive, la fertilisation maximum (100 unités) est une fumure normale de blé. Le niveau moyen du rendement montre nettement que l'azote aurait dû être appliqué à doses deux fois plus importantes. C'est à ces conditions, en tout cas, qu'une action éventuelle sur la structure aurait pu être valorisée.

En fait, le problème reste ouvert, car, dans l'essai cité ci-dessus, seules les fortes fumures azotées antérieures — ce qui n'était pas le cas ici — ont permis des rendements convenables en blé. Donc, dans l'absolu, les doses d'azote apportées tant sur le Dactyle que sur le blé furent insuffisantes et il serait très intéressant d'étudier cet aspect dans de nouvelles situations en concevant des dispositifs suffisamment souples afin de pouvoir diversifier ultérieurement les niveaux de fertilisation, ce qui amène à préférer les plans hiérarchisés aux plans fixés.

*Reçu pour publication en mai 1970.*

## SUMMARY

STUDY OF THE RESIDUAL EFFECTS
OF FODDER CROPS ON ARABLE CULTURES.

IV. — EFFECTS OF DIFFERENT METHODS
OF PASTURE FALLOWING ON THE YIELDS OF A WHEAT AND A MAIZE

The way of fallowing pasture land is an important factor of its residual effects. The results given here indicate the total yield of a winter wheat and a maize variety during the first and the second years of measurements.

The test was factorial, using as variables :

1. the dates of ploughing up (June, August) ;
2. the dates of nitrogen application (at ploughing up or at sowing the crop) ;
3. the nitrogen application (0 or 50 kg/ha).

The data obtained, concerned not only the crops themselves, but also the breakdown of the mineral nitrogen in the soil, studied by means of bi-monthly sampling.

The soil analyses show in particular that the plant manifests in advance the phenomena of mineralization that take place in untreated soil ; to some extent, the presence of vegetation accelerates the appearance of these phenomena.

Nevertheless, the study of the total yields obtained for the two crops, does not allow to reach firm conclusions :

1° as far as wheat is concerned, it is evident that the strongest influence was exerted by the nitrogen applied at sowing ;

2° as for the maize, the conditions prevailing during that particular year, a, dry one, undoubtedly had a levelling effect on the yields.

Another conclusion drawn from this experiment was the necessity of using several test crops, as the behaviour of a single plant can mask the true effects :

1° either because significant climatic variations minimize the growth potential ;

2° or because its own vegetative rhythm does not coincide with the manifestation of these effects.

## ZUSAMMENFASSUNG


### UNTERSUCHUNG DER NACHWIRKUNGEN VON FUTTERKULTUREN AUF PFLÜGBARE KULTUREN

### IV. — EINFLUSS DER UMPFLÜGENSART EINER WIESE AUF DIE ERTRÄGE EINER WEIZEN- UND EINER MAISSORTE

Die Umpflügensart einer Wiese stellt einen wichtigen Faktor hinsichtlich seiner Nach wirkurgen dar. Die hier eingeführten Ergebnisse betreffen das erste und zweite Untersuchungsjahr für ihre gesamte Erscheinung bei einer Winterweizen- und einer Maissorte.

Der Versuch war vom faktoriellen Typ mit folgenden Varianten :

1° die Umpflügenstermine (Juni, August) ;
2° die Stickstoffzufuhrtermine (beim Umpflügen, bei der Aussaat) ;
3° die Stickstoffgaben (0 oder 50 lg/ha).

Die zusammengestellten Ergebnisse, ausser denen bezüglich der Kulturen, beziehen sich auf die an Hand von halbmonatlichen Probenahmen untersuchte Entwicklung des mineralischen Stickstoffes im Boden.

Die Bodenanalysen zeigen insbesondere dass die Pflanze als Indikator im voraus für die Mineralisierungszustand eines unbewachsenen Bodens wirkt, es heisst, die Anwesenheit einer Vegetation beschleunigt gewissermassen das Auftreten der Erscheinungen.

Jedoch scheint es schwer aus den gesamten Leistungen der beiden Kulturen eine Schlusfolgerung zu ziehen :

1° für den Weizen. ist es offenbar, dass die zur Zeit der Aussaat zugebrachten Stickstoffmenge den wichtigsten Einfluss hat ;

2° für den Mais, ist es ausser Zweifel, dass die als trocken zu bezeichnenden Witterungsverhältnissen des Versuchsjahres die Erträge nivellierten.

Eine der Schlussfolgerungen, die von neuem aus diesen Versuchen gezogen werden kann, ist dass mehrere Test-Kulturen herangezogen werden müssen, weil das Verhalten einer einzigen Pflanze imstande ist, die Wirkungen zu maskieren :

1° sei es, dass wichtige klimatische Einflüsse die Möglichkeiten der Pflanze verkleinern,

2° oder dass ihr eigener Wachstumsrythmus nicht mit der Äusserung der Wirkungen übereinstimmt.

## РЕЗЮМЕ

*Изучение остаточных эффектов кормовых культур на пропашные. III. Влияние способа запашки лугового пласта на урожайность пшеницы и кукурузы.*

П. Жаккар, Л. Круазье, Г. Лефэвр.

Способ запашки лугового пласта является одним из важнейших факторов проявления остаточного эффекта луга. В данной работе представлены результаты первого и второго года измерения общего действия луга на озимую пшеницу, и на кукурузу. Опыт, факториального типа, заключал следующие переменные величины :

1) Даты запашки пласта (июнь и август).

2) Даты подкормок азотом (при вспашке и при посеве культуры).

3) Дозы азотных подкормок (от 0 до 50-ти кг./гектар).

Полученные данные, кроме культур, относятся к эволюции минерального азота в почве, которая изучалась на взятых два раза в месяц образцах почвы.

Анализы почвы показывают в частности, что ратение досрочно выражает минерализацию происходящую в почве; что присутствие растительности ускоряет, некоторым образом, манифестацию происходящих в почве явлений.

Однако, вывод общего заключения по поводу всей совокупности результатов достигнутвых обеими культурами, представляет некоторые трудности :

1. — что касается пшеницы, то ясно что азот внесенный при посеве играет главную роль;

2. — находится вне сомнения, что для кукурузы, условия года опыта, которые можно рассматривать как засушливые, с играли важную роль в выравнивании урожайности. И опять, одним из главных заключений данного опыта является факт необходимости нескольких культур — тестов, в виду того что поведение растения только одного вида может замаскировать эффекты :

— или, потому что важность роли играемой климатическими факторами минимизирует возможности растения;

— или, так как вегетативный ритм данного растения не совпадает с выражением эффектов.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BARKER M. G., 1963. Some effects of primary cultivations on crop yields in a four course rotation. *J. Agric. Sci.*, **61**, 173.

JACQUARD P., CROISIER L., MONNIER G., 1969 *a*. Étude des effets résiduels des cultures fourragères sur les cultures arables. I. Effets résiduels de la luzerne sur le blé et le maïs. *Ann. agron.*, **20** (4), 371-433.

JACQUARD P., CROISIER L., TRAINEAU R., 1969 *b*. Comparaison des informations recueillies sur les productions fourragères à trois niveaux de mesure. *Fourrages*, **39**, 3-28.

JACQUARD P., CROISIER L., 1970. Études des effets résiduels des cultures fourragères sur les cultures arables. III. Bilan de six années d'essais sur l'étude globale des effets résiduels et de leur durée. *Ann. agron.*, **21** (3), 247-268.

LEFÈVRE G., HIROUX G., 1969. Effets et arrière-effets sur blé d'une fumure azotée sur Ray-Grass d'Italie. *Ann. agron.*, **20** (1), 15-34.

# ANNEXE I

## *Calendrier cultural*

| Traitements | |
|---|---|
| 1-2-3-4 | 5-6-7-8 |
| 27/5/1966 Dernière coupe. | |
| 31/5/1966 Épandage de 50 unités d'azote sur les traitements 3 et 4. | |
| 2/6/1966 Passages de rotovator. | |
| | 22/8/1966 Dernière coupe. |
| | 24/8/1966 Épandage de 50 unités d'azote sur les traitements 7 et 8. |
| | 24/8/1966 Passages de rotovator. |
| 12/10/1966 Épandage de scories potassiques 14-14 sur l'ensemble du dispositif (100 unités de $K^2O$ et $P^2O^5$). | |
| 15/10/1966 Labour de l'essai. | |

| Sous-parcelles | |
|---|---|
| Blé | Maïs |
| 2/11/1966 Deux hersages et semis de « Capelle ». | |
| 28/11/1966 Épandage de 50 unités d'azote sur les traitements 2 et 4. | |
| | 16/3/1967 Reprise au cultivateur. |
| | 18/4/1967 Épandage de 50 unités d'azote sur les traitements 6 et 8. |
| | 19/4/1967 Enfouissement par deux passages de cultivateur. |
| | 21/4/1967 Semis de « I. N. R. A. 260 ». |
| 24/7/1967 Récolte. | |
| 22/8/1967 Déchaumage. | |
| | 8/10/1967 Récolte. |

ANNEXE

*Influence combinée des dates de*
*et des façons culturales sur l'évolution de*
*dans des sols sans culture ayant*

| N° | *Traitements* Date du retournement | Dates de prèlèvement Apport d'azote (1) R B S M | 7-3 **1** (2) | 21-3 **14** | 5-4 **29** | 17-4 **41** | 2-5 **56** | 23-5 **77** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 juin. | 31 mai 0 — 28 nov. — 18 avr. 0 | 43 | 49 | 67 | 81 | 51 | 56 |
| 2 | 2 juin. | 31 mai 0 — 28 nov. 50 — 0 | 40 | *78* | **62** | 67 | 68 | 70 |
| 3 | 2 juin. | 31 mai 0 — 28 nov. 50 — 50 | *66* | **36** | 55 | 66 | 74 | 81 |
| 4 | 2 juin. | 31 mai 50 — 28 nov. 0 — 0 | **24** | 48 | 57 | 66 | 72 | *88* |
| 5 | 24 août. | 24 août 0 — 0 | *78* | 53 | **44** | *63* | 49 | **48** |
| 6 | 24 août. | 24 août 0 — 28 nov. 50 — 0 | **21** | 41 | *60* | **32** | *52* | **23** |
| 7 | 24 août. | 24 août 0 — 28 nov. 50 — 50 | **55** | *120* | **50** | 64 | *80* | *80* |
| 8 | 24 août. | 24 août 50 — 28 nov. 0 — 0 | **20** | 37 | *88* | **55** | *80* | *80* |
| | | 24 août 50 — 28 nov. 0 — 50 | (31) | *53* | **44** | 47 | 48 | 66 |
| | | | **27** | *73* | **38** | *52* | **49** | *73* |
| | | | **48** | 54 | *72* | **45** | *64* | **54** |
| | | | **16** | *50* | **39** | 62 | 83 | *119* |
| | | | *82* | 67 | **48** | 60 | 78 | *93* |
| | | | **19** | 45 | 48 | 63 | **58** | *92* |
| | | | *50* | 44 | **36** | 40 | 39 | 58 |
| | | | **21** | 47 | 68 | *74* | **59** | 84 |
| Moyenne par prélèvements ..... | | | 40 | 56 | 55 | 59 | 63 | 73 |

Le maximum de teneur en azote minéral de chaque traitement est indiqué en chiffres italiques gras ; les pics en croissance, parfois décroissants, ne changent pas le sens des variations entre maxima et minima.

(1) R = Retournement ; S = Semis ; M = Maïs ; B = blé.

(2) Nombre de jours à compter du 7/3 ; () = Donnée manquante calculée.

2

*retournement, des apports d'azote*
*l'accumulation d'azote minéral* (kg/ha)
*porté auparavant du Dactyle*

| 7-6 **92** | 26-6 **111** | 10-7 **125** | 25-7 **140** | 10-8 **156** | 26-8 **172** | 5-9 **182** | Production moyenne d'azote | Classement |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 97 | 129 | 119 | 162 | 136 | 107 | 205 | 100,2 | 4 |
| 96 | 115 | 143 | ***190*** | 182 | 177 | 129 | 109,0 | 3 |
| 108 | 108 | 118 | ***214*** | 112 | 100 | 194 | 102,5 | 5 |
| **78** | *179* | 154 | **103** | 184 | 150 | ***262*** | 112,7 | 2 |
| 74 | *102* | **57** | 68 | 98 | 120 | ***131*** | 75,8 | 16 |
| 72 | 86 | 105 | 147 | ***165*** | 164 | 161 | 86,8 | 11 |
| **64** | 83 | 87 | *102* | **62** | 71 | ***116*** | 79,5 | 15 |
| **61** | 91 | 138 | 137 | ***161*** | 142 | 123 | 93,3 | 8 |
| 70 | *81* | **75** | **75** | 161 | ***167*** | 143 | 81,6 | 14 |
| **61** | 82 | 87 | ***186*** | 141 | ***168*** | 165 | 92,5 | 10 |
| 72 | *103* | **88** | 91 | ***132*** | 124 | 126 | 82,5 | 13 |
| **85** | 89 | *125* | **104** | ***184*** | 146 | 146 | 96,0 | 6 |
| **84** | **81** | 103 | *132* | **108** | ***245*** | **95** | 98,1 | 7 |
| **64** | 91 | 98 | *165* | 137 | **92** | ***230*** | 92,6 | 9 |
| 72 | 89 | 95 | 101 | ***144*** | 109 | 107 | 75,7 | 12 |
| 93 | 124 | 187 | ***241*** | **158** | **154** | *232* | 118,6 | 1 |
| 78 | 102 | 111 | 139 | 142 | 140 | 160 | | |

intermédiaires, en chiffres italiques; les minima intermédiaires, en chiffres gras. Les chiffres intercalaires, généralement

## ANNEXE 3

*Exportation d'azote par le Maïs*

| Traitements | Apport d'azote | | Exportations (kg/ha N) | | | | Teneur en azote (en %) | | | Exportations — apports (kg N/ha) (2) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | R (1) | S (1) | Grain | Paille | Rafles | Total | Grain | Paille | Rafles | |
| 1 Retournement de juin | 0 | 0 | 92,23 | 55,09 | 4,45 | 151,77 | 1,89 | 1,13 | 0,43 | + 152 |
| 2 | 0 | 50 | 93,97 | 57,35 | 5,34 | 156,66 | 1,98 | | 0,46 | + 107 |
| 3 | 50 | 0 | 102,87 | 56,08 | 5,56 | 164,51 | 1,91 | | 0,45 | + 115 |
| 4 | 50 | 50 | 90,92 | 57,35 | 5,59 | 153,86 | 2,01 | | 0,48 | + 54 |
| 5 Retournement d'août | 0 | 0 | 91,55 | 57,64 | 4,93 | 154,12 | 1,87 | 1,13 | 0,43 | + 154 |
| 6 | 0 | 50 | 90,89 | 56,64 | 5,11 | 152,64 | 2,06 | | 0,45 | + 103 |
| 7 | 50 | 0 | 82,78 | 57,21 | 5,02 | 145,01 | 1,80 | | 0,43 | + 95 |
| 8 | 50 | 50 | 99,14 | 62,31 | 5,78 | 167,23 | 2,10 | | 0,49 | + 67 |
| P.p.d.s. | | | 6,21 | NC | NC | NS | | | | |
| 1-5 | 0 | 0 | 91,89 | 56,36 | 4,69 | 152,94 | 1,88 | 1,13 | 0,43 | + 153 |
| 2-6 | 0 | 50 | 92,43 | 57,00 | 5,23 | 154,66 | 2,02 | | 0,45 | + 105 |
| 3-7 | 50 | 0 | 92,83 | 56,64 | 5,29 | 154,76 | 1,86 | | 0,44 | + 105 |
| 4-8 | 50 | 50 | 95,03 | 59,83 | 5,69 | 160,55 | 2,05 | | 0,48 | + 61 |
| P.p.d.s. | | | NS | NC | NC | NS | | | | |
| Juin | | | 95,00 | 56,47 | 5,34 | 156,71 | 1,95 | 1,13 | 0,45 | + 107 |
| Août | | | 91,09 | 58,45 | 5,21 | 154,75 | 1,96 | 1,13 | 0,45 | + 105 |
| P.p.d.s. | | | 3,10 | NC | NC | NS | | | | |

(1) R = Retournement ; S = Semis.

(2) Cette différence estime l'azote issu de la minéralisation pour les seuls traitements 1 et 5. Pour les autres, c'est une appréciation du bilan d'azote dans l'hypothèse d'une efficacité totale de l'engrais.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (4), 385-402.

# ÉTUDE DES VARIATIONS DE LA COMPOSITION MINÉRALE, PROTIDIQUE ET GLUCIDIQUE DES RACINES ET DES PARTIES AÉRIENNES DU DACTYLE (INFLUENCE DE LA FERTILISATION POTASSIQUE)

Elisabeth LEFEBVRE-DROUET
avec la collaboration technique de Monique JACQUIN

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches de Dijon*
*Institut national de la Recherche agronomique*

## RÉSUMÉ

Pendant deux années consécutives, sur un dactyle cultivé en plein champ, nous avons suivi en fonction du stade végétatif et d'une fertilisation potassique l'évolution de la composition chimique et biochimique des racines et parties aériennes.

L'étude des plateaux de tallage et des racines prélevés à chaque coupe, montre que la composition minérale (K, Ca, Mg, Na, P), protidique (azote total, azote soluble), glucidique (glucides solubles totaux, réducteurs, saccharose) reste à peu près constante au cours de ces deux années.

L'analyse des parties aériennes prélevées à intervalles réguliers au cours de chaque cycle végétatif met en évidence une variation importante du taux de ces divers constituants, en fonction du stade de croissance. L'évolution au cours du premier cycle (cycle de reproduction) est différente de celle des autres cycles essentiellement végétatifs. Les conditions climatiques jouent également un rôle important.

Une comparaison entre la composition des parties aériennes et celle des plateaux de tallage et des racines fait apparaître des différences dans la teneur des divers constituants.

Dans nos conditions expérimentales, l'application d'une forte fertilisation potassique a peu d'influence sur la composition des parties souterraines alors qu'elle modifie l'équilibre des cations, la teneur en eau et la quantité de sucres réducteurs des parties aériennes.

## INTRODUCTION

Les graminées fourragères ont fait l'objet de nombreuses études depuis l'extension des surfaces affectées à la prairie temporaire. Les premiers travaux orientés sur les problèmes de fertilisation visaient surtout à accroître le niveau de production et à préciser les exportations des principaux éléments minéraux. D'autres recherches ont abordé la physiologie de la plante en considérant essentiellement les parties aériennes.

Réalisées soit en milieu artificiel, soit en milieu naturel, elles ont montré que la composition chimique et biochimique varie selon le stade de développement, le cycle végétatif, la nutrition minérale et le mode d'exploitation de la prairie. Parmi les travaux effectués en plein champ, nous pouvons citer ceux de GUÉGUEN et FAUCONNEAU (1959-1960), FLEMING et COULTER (1963), WAITE et BOYD (1953-1958), GAUSSÈRES (1965), J.-M. LEFEBVRE (1969). Les racines, par contre, ont été très peu étudiées. Il faut noter qu'en milieu naturel le prélèvement et la préparation des échantillons présentent de grandes difficultés. Les travaux relatés traitent surtout des aspects morphologiques et des problèmes d'enracinement.

Afin d'apporter des données sur la composition chimique et biochimique des racines parallèlement à celle des parties aériennes, il nous a paru intéressant de suivre, sur une culture de dactyle, les variations de la composition minérale, protidique et glucidique des différentes parties de la plante au cours des divers cycles végétatifs.

## MATÉRIEL ET TECHNIQUES UTILISÉES

### I. — *Matériel*

L'expérience porte sur un dactyle variété *Floréal* cultivé dans un sol brun argileux neutre au domaine de Bretenière dans la région de Dijon. Les caractéristiques de ce sol ont été données par DUTHION (1966).

La fertilisation potassique faisant l'objet d'une étude sur ce sol, l'influence éventuelle de cette fertilisation sur l'évolution des divers constituants de la plante sera également soulignée.

La végétation a été suivie pendant deux années consécutives 1966 et 1967 (4 coupes ont eu lieu en 1966 dont une de régularisation, 4 coupes en 1967). La première coupe intervient début épiaison, les autres tous les 35 à 40 jours.

Le protocole expérimental est le suivant : blocs Fisher, 4 répétitions, deux traitements : l'un avec une forte fumure potassique et l'autre sans aucun apport de K. La fertilisation a été apportée dans les conditions suivantes :

TABLEAU I

| Dates d'apport | Fumure uniforme N-P | | Traitement K (kg/ha) | |
|---|---|---|---|---|
| | N kg/ha | P kg/ha | 1 = témoin | 2 |
| 1965 : hiver..... | | 44 | 0 | 332 |
| 1966 : printemps ..... | 90 | | | |
| 1re coupe..... | 60 | | | |
| 2e coupe ..... | 60 | | | |
| 3e coupe ..... | 50 | | 0 | 166 |
| hiver..... | | 44 | 0 | 332 |
| 1967 : printemps ..... | 100 | | 0 | |
| 1re coupe..... | 80 | | 0 | 166 |
| 2e coupe ..... | 100 | | 0 | 166 |
| 3e coupe ..... | 100 | | | |

Les deux années 1966 et 1967 ont été des années normalement humides pour la région. En 1967, une irrigation a été effectuée chaque fois que le déficit hydrique du sol atteignait 50 mm. Le tableau suivant donne la répartition de la pluviométrie par cycle végétatif :

TABLEAU 2

| Différents cycles | 1966 | | | | 1967 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Dates des coupes | 4-5 | 21-6 | 29-8 | 14-11 | 16-5 | 28-6 | 25-7 | 11-9 |
| Précipitations en mm | 107,7 | 142,8 | 117,5 | 148,9 | 130,0 | 117,4 | 33,5 | 77,0 |
| Irrigations en mm | | | | | 50 le 28-4 | 50 le 14-6 | 50 le 30-6<br>50 le 18-7 | 50 le 28-7<br>50 le 3-8 |

## II. — *Mode de prélèvement*

### 2. 1. *Racines.*

Elles ont été prélevées au début du printemps et à chaque coupe. Chaque prélèvement correspondant à une touffe de dactyle est effectué sur une section horizontale de 20 cm × 10 cm et une profondeur de 20 cm par deux tranches de 10 cm de hauteur. La première tranche de 0-10 cm représente la zone de plateau de tallage et la majorité des grosses racines, la deuxième tranche de 10-20 cm, les racines fines. Chaque bloc de terre est pesé humide dès le prélèvement, puis lavé sous un jet d'eau froide sur tamis pour extraire les racines (WILLIAMS and BAKER, 1957). Les plateaux de tallage sont séparés des racines. Nous obtenons ainsi trois fractions : zone de plateau de tallage, racines 0-10 cm, racines 10-20 cm ; chaque fraction est lavée de nouveau à l'eau glacée permutée, séchée sur filtre, pesée humide, coupée en petits fragments ; une partie est séchée à 105°C pour la détermination de la matière sèche, l'autre partie destinée aux dosages des composés azotés et glucidiques est fixée dans l'alcool à 96°GL bouillant et maintenue à l'ébullition pendant 30 minutes, durée nécessaire pour détruire toute action enzymatique, refroidie et conservée en chambre froide.

### 2. 2. *Parties aériennes.*

Les prélèvements ont été faits périodiquement au cours de chaque cycle de croissance, environ tous les 15 jours et à la coupe.

Le détail du mode de prélèvement a été décrit par J.-M. LEFEBVRE (1967) : deux prises d'essai sont effectuées par échantillon. L'une est mise à l'étuve à 105°C pour la détermination de l'humidité et des matières minérales. L'autre destinée aux dosages des composés azotés et des glucides solubles totaux est séchée sous vide à 45°C en présence d'un déshydratant, puis broyée et conservée en chambre froide.

En vue de procéder à des analyses plus détaillées des glucides (sucres réducteurs, saccharose), il est nécessaire d'arrêter rapidement leur évolution après le prélèvement. Une modification a donc été apportée en 1967. La fraction destinée au dosage des composés azotés et glucidiques est fixée au moment du prélèvement, dans l'alcool à 96° GL bouillant et maintenue à l'ébullition 5 minutes, durée suffisante et nettement plus courte que pour les racines du fait de la faible épaisseur des cellules à détruire. Après refroidissement, les échantillons sont conservés en chambre froide.

## III. — *Méthodes analytiques*

1° *Sur les échantillons de végétaux séchés à 105°C sont dosés les matières minérales et l'azote total.*

*Matières minérales.*

Elles sont déterminées dans le résidu de calcination (GUEGUEN et FAUCONNEAU, 1960). Les techniques usuelles ont été utilisées :

Ca, Mg par complexométrie
K, Na par photométrie de flamme
P par colorimétrie au réactif nitrovanadomolybdique

*Azote total.*

L'azote total est dosé selon la méthode Kjeldhal, après réduction des nitrates.

2° *Sur les échantillons fixés dans l'alcool sont dosés les composés azotés solubles et les composés glucidiques.*

*Extraction de ces différents composés.*

*Parties aériennes.* — Trois extractions sont nécessaires.

L'échantillon dans l'alcool (15 g de matière verte dans 250 ml d'alcool) est broyé à l' « omni-mixer Sorvall », recueilli dans un bécher et mis sur bain de sable à 80°C environ, pendant 20 minutes. Après décantation et filtration sur verre fritté ou büchner sous vide, le résidu dans le bécher est additionné d'alcool à 50°GL (environ 300 ml), mis sur bain de sable 6 minutes pour une deuxième extraction ; après décantation et filtration on procède à une troisième extraction de 6 minutes. Le filtrat recueilli après les trois filtrations est amené à un volume de 250 ml par concentration sous vide dans un évaporateur rotatif (Büchy).

*Racines.* — Le procédé est le même, mais quatre extractions de 20 minutes sont nécessaires pour obtenir une bonne solubilisation des composés.

*Dosages proprement dits.*

Ils ont été décrits en détail par J.-M. LEFEBVRE (1967).

— Azote soluble total par la méthode KJELDAHL après réduction des nitrates,
— Glucides réducteurs solubles par la méthode SOMOGYI,
— Glucides solubles totaux après hydrolyse par HCl à pH 2,
— Saccharose après action de l'invertase et dosage par la méthode SOMOGYI.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'influence de la fertilisation potassique ne sera mentionnée que lorsque des différences significatives apparaîtront dans nos résultats.

### I. — *Plateaux de tallage et racines*

1. 1. *Évolution pondérale au cours des deux années* (fig. 1).

La masse des plateaux de tallage varie de 2 à 4 tonnes/ha au cours des deux années. En 1966, nous notons une augmentation progressive à chaque coupe et une diminution en fin d'année. En 1967, l'augmentation est plus faible et après la deuxième coupe, nous enregistrons une nette diminution, sans doute due au vieillissement de la prairie qui est en dernière année d'exploitation.

Dans la zone 0-10 cm, le poids de racines est compris entre 1 et 2 tonnes/ha. L'évolution est sensiblement la même que celle des plateaux de tallage.

La zone 10-20 cm est caractérisée par une quantité de racines très faible, de l'ordre de 0,1 à 0,4 tonne/ha. Il faut noter que la récupération de ces racines est très délicate, et au cours des différents lavages, il y a une perte assez importante en racines fines.

A chaque coupe, nous avons calculé les rapports zone de plateau de tallage et racines 0-10 cm/parties aériennes ; les variations en sont données sur la figure 2.

Ces deux rapports évoluent de façon identique : ils augmentent considérablement au fur et à mesure des coupes, sauf à la dernière de 1967, mais comme nous l'avons déjà signalé, la prairie est en fin d'exploitation.

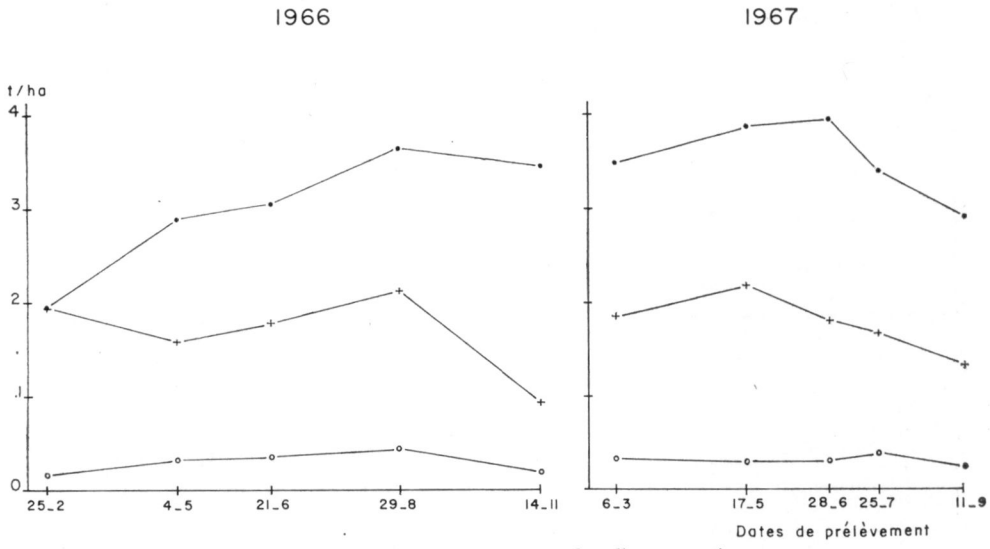



FIG. 1. — *Variations des plateaux de tallage et racines au cours des deux années de végétation*

· —— ZPT
\+ —— 0-10 cm
○ —— 10-20 cm

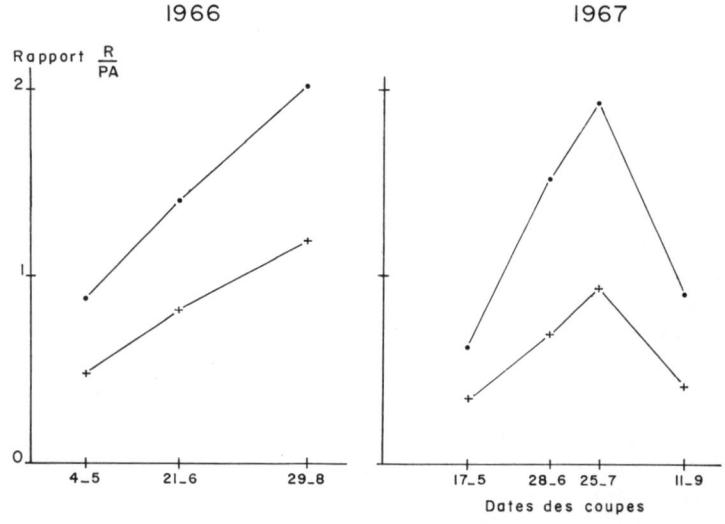



FIG. 2. — *Variations du rapport racines sur parties aériennes au cours des différentes coupes*

$\cdot$ —— $\cdot$ $\frac{\text{rapport zone de plateau de tallage}}{\text{parties aériennes}}$

$+$ —— $+$ $\frac{\text{rapport racines zone 0-10 cm}}{\text{parties aériennes}}$

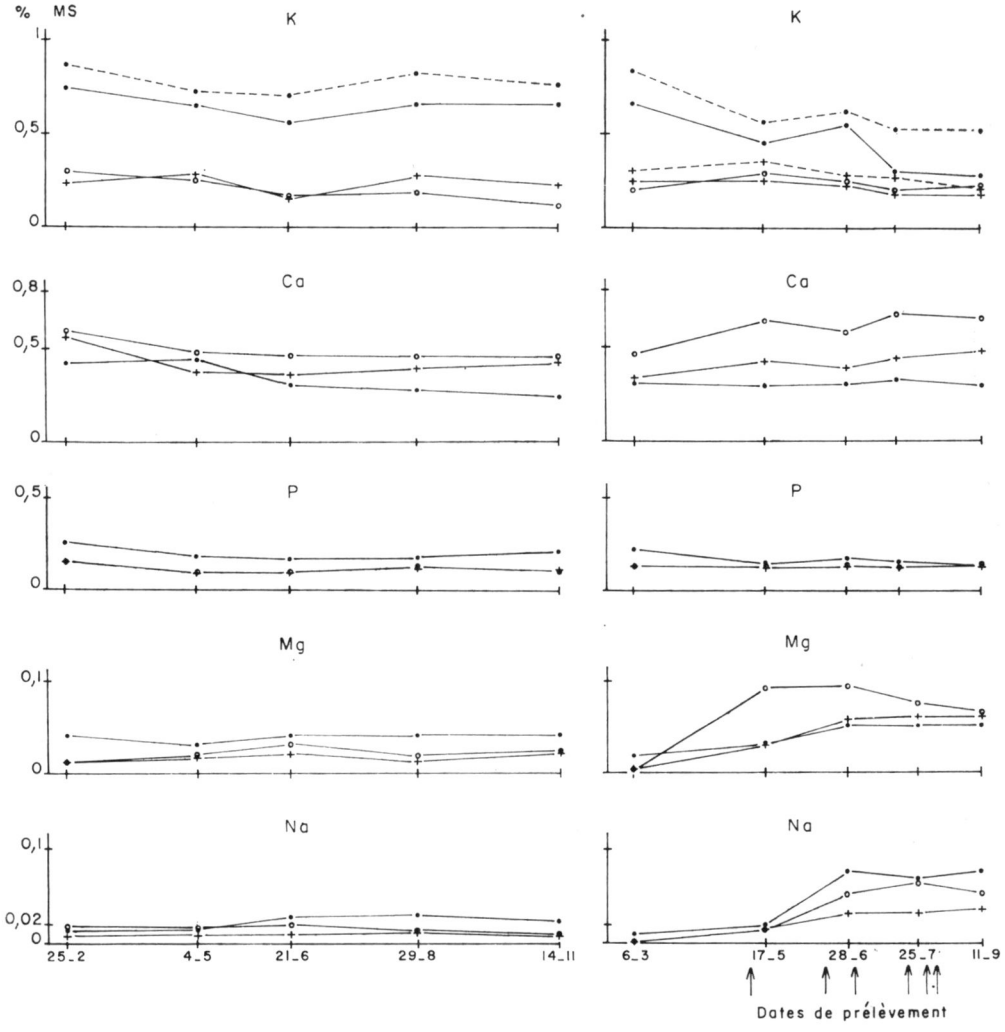



FIG. 3. — *Variations des teneurs en K, Ca, P, Mg, Na dans les différentes zones de racines au cours des deux années de végétation*

• —— • ZPT • - - - - • ZPT traitement K
\+ —— + 0-10 cm + - - - - + 0-10 traitement K
○ —— ○ 10-20 cm
↑ irrigations

1. 2. *Composition minérale.*

Les variations des différents éléments sont représentées sur la figure 3.

— *K :* dans la zone de plateau de tallage, les variations au cours de l'année 1966 oscillent entre 0,55 à 0,75 p. 100 de matière sèche ; en 1967, nous observons une diminution après chaque coupe sauf à la deuxième, le taux passe de 0,65 au début du premier cycle à 0,30 p. 100 à la fin du quatrième.

Dans les parcelles ayant reçu la forte fumure potassique nous remarquons une teneur en K plus importante et la variation est à peu près identique à celle du témoin. Cette différence de teneur en K est dans l'ensemble significative.

Les racines des zones 0-10 cm et 10-20 cm ont la même teneur en K, comprise entre 0,1 et 0,3 p. 100 ; en 1967, cette teneur apparaît plus importante dans les racines 0-10 cm des parcelles ayant reçu la fertilisation potassique que dans celles du témoin, mais la différence n'est pas significative.

— *Ca :* les variations de la teneur en Ca sont en général faibles au cours des deux années de végétation. La teneur est plus élevée dans la zone des racines 10-20 cm, que dans celle du plateau de tallage (0,5 à 0,6 p. 100 contre 0,3 p. 100).

— *Mg :* les teneurs sont très faibles ; en 1966, elles restent constantes aux environs de 0,02 ou 0,04 p. 100 selon l'horizon considéré ; en 1967, elles sont plus importantes, il se pourrait que l'eau utilisée pour l'irrigation soit cause de cette augmentation. Il faut noter que la teneur en Mg augmente à partir du moment où l'on a irrigué.

— *Na :* les quantités de Na sont également très faibles. Nous ferons les mêmes observations que pour le magnésium.

— *P :* la teneur est sensiblement la même dans les trois horizons de racines ; elle reste constante au cours des deux années, aux environs de 0,15 p. 100.

1. 3. *Matières azotées* (fig. 4).

— *Azote total :* la teneur est à peu près la même dans les trois zones de racines étudiées, la variation au cours de l'année est faible, les valeurs oscillant entre 0,70 et

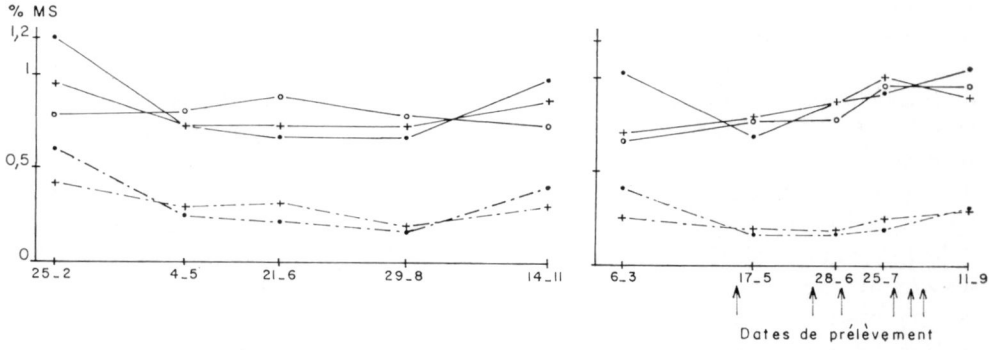



FIG. 4. — *Variations de l'azote total et azote soluble dans les différentes zones de racines pendant les deux années de végétation*

N total · —— ZPT N soluble · — . — . — ZPT
\+ —— 0-10 cm + — . — . — 0-10 cm
o —— 10-20 cm o — . — . — 10-20 cm
↑ irrigations

1 p. 100. Elle sont du même ordre de grandeur que celles mentionnées par SPRAGUE et SULLIVAN (1950). Dans la zone du plateau de tallage, nous enregistrons une diminution de la teneur à la fin du premier cycle, puis une stabilisation ou une légère augmentation aux cycles suivants, selon l'année.

Dans la zone 0-10 cm, l'évolution est identique à celle des plateaux de tallage; sauf à la fin du premier cycle de 1967 où nous n'observons pas de diminution.

Dans la zone 10-20 cm, le taux reste à peu près constant en 1966 et en 1967, nous notons au fur et à mesure des coupes une augmentation identique à celle de la zone 0-10 cm.

— *Azote soluble :* nous notons les mêmes observations que pour l'azote total ; le taux varie entre 0,2 et 0,4 p. 100. Les racines de la zone 10-20 cm étant en quantité très faible, il n'a pas été possible de les analyser.

1. 4. *Glucides* (fig. 5).

— *Glucides solubles totaux :* la teneur et l'évolution sont les mêmes dans les zones de plateaux de tallage et de 0-10 cm. Les variations sont faibles au cours des deux années. La moyenne se situe aux alentours de 2 à 3 p. 100. BAKER et GARDWOOD (1961) signalent des teneurs assez faibles variant de 0,7 à 3,5 p. 100 pour les plateaux de tallage, et inférieures à 2 p. 100 pour la zone des racines.

Dans la zone 10-20 cm, la teneur est beaucoup plus élevée, elle est supérieure à 5 p. 100 et peut atteindre 11 p. 100 ; il faut cependant noter que la quantité de matériel prélevé est très faible, les analyses sont donc très imprécises, néanmoins, nous trouvons toujours des taux nettement supérieurs à ceux des plateaux de tallage et des racines de l'horizon 0-10 cm.

— *Glucides réducteurs :* nous notons les mêmes observations que pour les glucides solubles totaux. Ils se trouvent en faible quantité, ( < 1 p. 100) et ne varient pas au cours de l'année, sauf dans la zone 10-20 cm.

— *Saccharose :* le comportement est le même que celui des glucides réducteurs, mais la teneur est plus élevée.

En résumé, nous pouvons remarquer qu'à chaque coupe, la composition minérale des divers horizons de racines reste à peu près la même.

Les variations sont en général faibles, la plus importante est celle du potassium dans les plateaux de tallage, au cours de l'année 1967, bien que les valeurs trouvées ne soient pas exemptes de critique. En effet, il faut noter les difficultés rencontrées pour la préparation des échantillons, car malgré tout le soin apporté aux lavages, il n'est pas possible d'éliminer la totalité de l'argile ; quelques particules très fines restent collées aux racines et constituent ainsi une cause d'erreur, surtout sur la valeur du potassium. Cette erreur reste probablement limitée puisque la variabilité des mesures faites sur les répétitions n'est pas importante. Les variations de la composition protidique et glucidique sont également faibles. Les teneurs sont assez voisines dans les trois zones de racines considérées, sauf dans le cas des glucides où nous avons noté une teneur très élevée dans la zone 10-20 cm. Cette observation est intéressante car on attribue à ces racines un rôle très actif dans la nutrition de la plante.

Ces résultats concordent bien avec les remarques de SPRAGUE et SULLIVAN (1950). Ces auteurs ont en effet observé dans les plateaux de tallage et les racines, une chute du taux de glucides consécutive à chaque coupe, puis ceux-ci sont à nou-

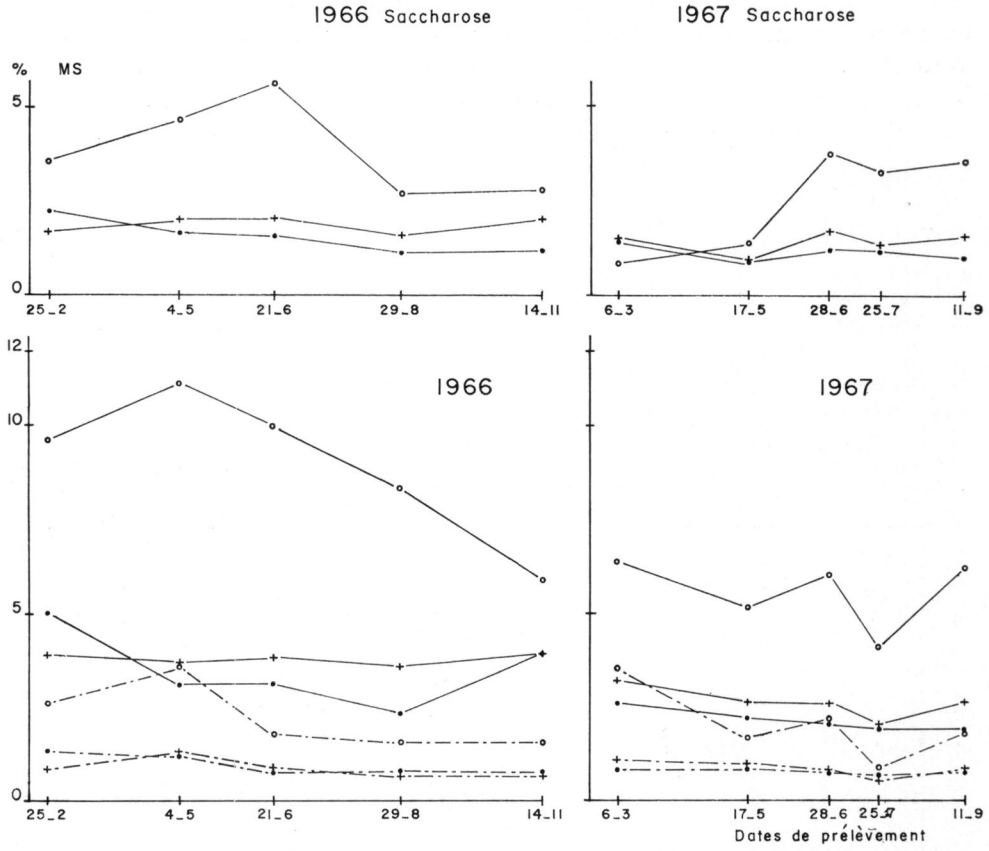



FIG. 5. — *Variations des glucides solubles totaux, glucides réducteurs et saccharose dans les différentes zones de racines pendant deux années de végétation*

· —— ZPT · —.—.— ZPT
\+ —— 0-10 cm + —.—.— 0-10 cm
○ —— 10-20 cm ○ —.—.— 10-20 cm
Glucides solubles totaux Glucides réducteurs
Saccharose

veau accumulés progressivement jusqu'à atteindre une valeur identique au taux initial, au moment de la coupe suivante.

De même, TROUGHTON (1957) mentionne que les composés minéraux et azotés des parties souterraines sont peu affectés par la défoliation bien que quelques changements puissent intervenir dans les métabolismes azotés.

La fertilisation potassique a une influence très réduite car nous avons constaté qu'elle n'agit que sur la teneur en K des plateaux de tallage.

## II. — *Parties aériennes*

### 2. 1. *Production de matière sèche.*

Au cours des deux années, nous ne notons pas de différence de rendement entre parcelles traitées et témoins ; mais le pourcentage d'humidité est plus élevé dans les

échantillons du traitement K que dans ceux du témoin, cette différence n'est significative qu'à partir de la deuxième année. Cette même observation a été faite par WARNE (1936).

TABLEAU 3

*Rendements de chaque coupe* (tonnes de matière sèche par ha)

| | Année 1966 | | | Année 1967 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1re coupe 4-5-66 | 2e coupe 21-6-66 | 3e coupe 29-8-66 | 1re coupe 16-5-67 | 2e coupe 28-6-67 | 3e coupe 25-7-67 | 4e coupe 11-9-67 |
| Témoin ..... | 3,25 | 2,20 | 1,80 | 6,30 | 2,60 | 1,75 | 3,20 |
| Traitement K .... | 3,55 | 2,40 | 1,70 | 6,20 | 2,50 | 1,75 | 3,25 |
| Signification ..... | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS |

Pourcentage de matière sèche

| | Année 1966 | | | Année 1967 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1re coupe 4-5-66 | 2e coupe 21-6-66 | 3e coupe 29-8-66 | 1re coupe 16-5-67 | 2e coupe 28-6-67 | 3e coupe 25-7-67 | 4e coupe 11-9-67 |
| Témoin ..... | 17,6 | 24,2 | 35,8 | 19,1 | 19,7 | 25,3 | 22,8 |
| Traitement K .... | 17,8 | 25,1 | 35,0 | 18,4 | 17,5 | 23,0 | 21,1 |
| Signification ..... | NS | NS | NS | S | S | S | S |

2. 2. *Composition minérale* (fig. 6).

Les valeurs correspondant au traitement K ne sont représentées sur le graphique que lorsqu'elles sont différentes de celles du témoin.

— *K :* l'évolution du potassium est la même à chaque cycle végétatif, la teneur diminue de façon importante et régulière au cours de la croissance. Au fur et à mesure des coupes, il y a diminution de K dans la plante. Ce phénomène est moins net la deuxième année, ceci étant probablement dû à l'irrigation. En effet, GUÉGUEN (1960) note que les périodes pluvieuses ont une action favorable sur l'absorption de K par la plante.

Comme l'ont fait remarquer de nombreux auteurs, nous observons une plus grande teneur en K dans les plantes ayant reçu la fumure potassique.

— *Ca :* l'évolution est sensiblement la même au cours des deux années de végétation : nous constatons une diminution de la teneur en Ca de la plante au cours du premier cycle, le taux passe de environ 0,6 p. 100 au début à 0,35 p. 100 en fin de cycle ; par contre, à partir du 2e cycle, il y a enrichissement en Ca tout au long du cycle.

GUÉGUEN (1960) note que les feuilles sont plus riches en Ca que les tiges et gaines. Dans nos conditions d'exploitation, au cours du premier cycle, le rapport feuilles sur tiges et gaines décroît brutalement et la teneur en Ca des feuilles ne peut

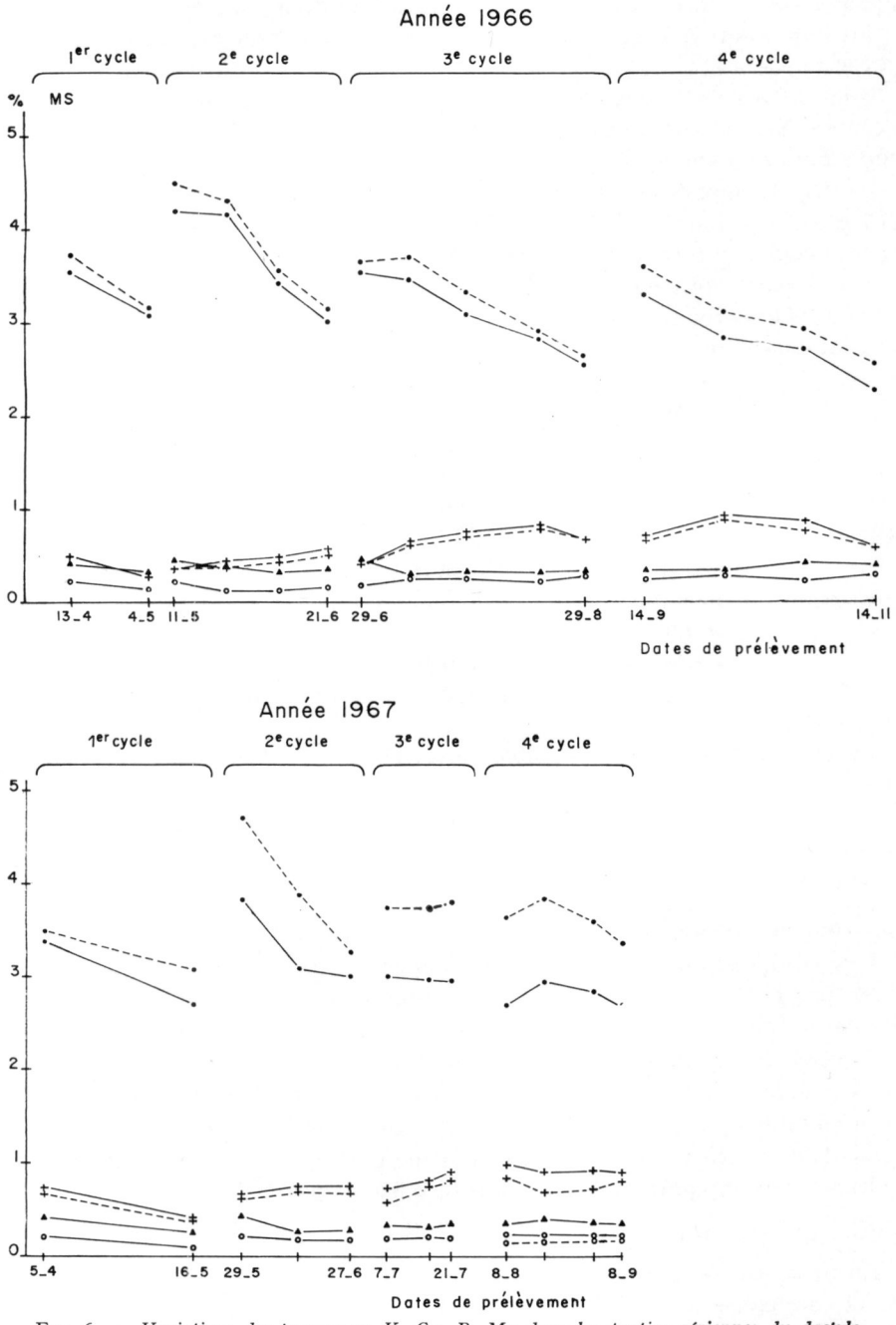



FIG. 6. — *Variations des teneurs en K, Ca, P, Mg dans les parties aériennes du* ***dactyle*** *au cours de chaque cycle végétatif pendant deux années*

· —— K témoin · — — — K traitement K
\+ —— Ca " \+ — — — Ca "
▲ —— P "
○ —— Mg "

compenser cette chute ; mais à partir du deuxième cycle, la proportion de feuilles est plus importante que celle des tiges et gaines, ce qui peut expliquer l'enrichissement en Ca.

Nous notons également un enrichissement en Ca de la plante au fur et à mesure des coupes. Nous observons une teneur plus faible en Ca dans les plantes qui ont reçu la forte fumure potassique.

— *Mg :* le taux de cet élément varie peu au cours des cycles végétatifs. Il reste inférieur à 0,3 p. 100. Il y aurait une légère augmentation de Mg dans la plante au cours des coupes successives ; FLEMING et COULTER (1963) ont fait cette même constatation. A partir du troisième cycle de la deuxième année de végétation, la teneur en Mg des plantes du traitement K est plus faible que celle du témoin. Ces observations sont en accord avec celles de SCHUFFELEN (1967) et DELAS (1967).

— *Rapport* $\frac{K}{Ca + Mg}$ : il évolue de façon identique au cours des deux années : augmentation entre le début et la fin du premier cycle et évolution en sens inverse au cours des cycles suivants. Ce rapport est plus élevé dans le traitement K que dans le témoin ; cette différence est plus marquée au cours de la deuxième année d'exploitation.

— *Na :* la variété de dactyle étudiée est très pauvre en Na : en 1966, le maximum est de 0,06 p. 100 de matière sèche ; l'évolution est à peu près identique à celle de Ca. En 1967, du fait de l'irrigation, nous constatons un enrichissement très marqué en Na au cours de chaque cycle végétatif ; la teneur atteint 0,2 p. 100 à la fin du dernier cycle. Une étude de S. MÉRIAUX (1961) sur l'irrigation du dactyle mentionne ces mêmes observations.

Étant donné la teneur très faible de cet élément, ses variations n'ont pas été portées sur le graphique.

— *P :* les variations sont de faible amplitude. Il y a diminution de la teneur en P au cours du premier cycle ; pour les autres cycles, cette teneur reste à peu près constante et ne dépasse pas 0,4 p. 100.

2. 3. *Matières azotées* (fig. 7).

Une étude détaillée des composés azotés et glucidiques du Dactyle ayant été réalisée par J.-M. LEFEBVRE en 1967, nos résultats confirmant les siens, nous nous contenterons de les citer sans les commenter.

— *Azote total :* l'évolution est la même pendant les deux années. Nous enregistrons à chaque cycle végétatif une diminution importante et régulière entre le début (teneur environ 4 p. 100) et la fin de chaque cycle (teneur environ 2 p. 100).

— *Azote soluble :* la variation est la même que celle de l'azote total avec une amplitude beaucoup plus faible, elle varie de 0,8 à 0,4 p. 100 de matière sèche.

2. 4. *Glucides* (fig. 7).

En 1966, seuls les glucides solubles totaux ont été dosés. En 1967, glucides réducteurs et saccharose ont été étudiés en complément. La modification, apportée en 1967 quant au mode de prélèvement des échantillons, n'affecte pas les valeurs des glucides solubles totaux. Nos résultats des deux années peuvent donc être comparés.

— *Glucides solubles totaux :* en 1966, leurs variations sont identiques à celles mentionnées par J.-M. LEFEBVRE (1967). En 1967, aux deuxième et troisième cycles,

l'évolution est différente de celle de l'année précédente ; nous remarquons une diminution importante du taux de glucides à la fin de ces cycles dont la durée a été très courte. Cette diminution peut s'expliquer de la façon suivante : pendant la période d'été, la photosynthèse est très active, des irrigations d'appoint ont eu lieu pour pallier le déficit hydrique, d'où croissance accélérée de la plante. L'alimentation azotée étant optimale, la synthèse protéique est très rapide et, de ce fait, une partie des chaînes carbonées des acides organiques provenant de la photosynthèse est utilisée pour la synthèse des amino-acides préférentiellement à celle des glucides simples.

En général, au cours de 1967, la teneur en glucides est moins élevée qu'en 1966. La fertilisation azotée a été plus importante et J.-M. LEFEBVRE (1968) enregistre toujours une quantité de glucides plus faible pour des quantités d'azote plus fortes.

Pour les deux années de végétation, nous retrouvons les deux maxima mentionnés par GAUSSÈRES (1965) et divers auteurs, l'un au printemps, l'autre à l'automne.

— *Sucres réducteurs. Saccharose :* les variations de leur teneur sont consignées dans le tableau suivant :

TABLEAU 4

| | 1er cycle | | 2e cycle | | | 3e cycle | | | 4e cycle | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 5-4 | 16-5 | 29-5 | 13-6 | 27-6 | 7-7 | 18-7 | 24-7 | 8-8 | 18-8 | 31-8 | 8-9 |
| *Réducteurs :* | | | | | | | | | | | | |
| Témoin ..... | 2,49 | 5,25 | 1,62 | 3,16 | 2,11 | 1,19 | 1,86 | 1,58 | 1,37 | 1,82 | 2,54 | 2,67 |
| Traitement K | 2,19 | 4,89 | 1,46 | 2,07 | 1,69 | 0,99 | 1,38 | 1,39 | 1,38 | 1,87 | 1,99 | 2,12 |
| Signification .. | S | NS | NS | S | S | NS | S | NS | NS | NS | S | S |
| *Saccharose :* | | | | | | | | | | | | |
| Témoin ..... | 8,01 | 3,04 | 6,00 | 4,84 | 3,01 | 3,82 | 3,00 | 2,71 | 3,10 | 3,73 | 3,03 | 3,60 |
| Traitement K | 8,16 | 3,22 | 5,94 | 4,97 | 2,91 | 4,01 | 2,63 | 2,67 | 3,06 | 3,82 | 3,19 | 4,06 |

Les chiffres de ce tableau font apparaître une quantité importante de sucres réducteurs à la fin du premier cycle qui correspond au début de l'épiaison ; aux cycles suivants, la teneur est beaucoup plus faible et on observe quelques fluctuations en cours de croissance. Dans l'ensemble, la quantité de sucres réducteurs a tendance à être plus élevée dans le témoin que dans le traitement K. La différence est parfois significative.

Contrairement aux sucres réducteurs, la teneur en saccharose diminue fortement à la fin des premier et deuxième cycles ; ensuite les variations paraissent moins importantes. Les teneurs sont sensiblement les mêmes à la fin de chaque cycle, sauf au quatrième. Nous ne trouvons pas de différence entre le témoin et le traitement K.

Ces résultats mettent bien en évidence l'influence du stade de croissance, du cycle végétatif et des conditions climatiques sur les variations de la composition chimique et biochimique des parties aériennes.

La fertilisation potassique a une influence plus marquée sur les parties aériennes que sur les racines. Elle agit à la fois sur la teneur en eau, sur la composition minérale (augmentation du taux de K et diminution de celui de Ca et Mg) et sur une fraction des composés glucidiques (diminution de la quantité de sucres réducteurs).

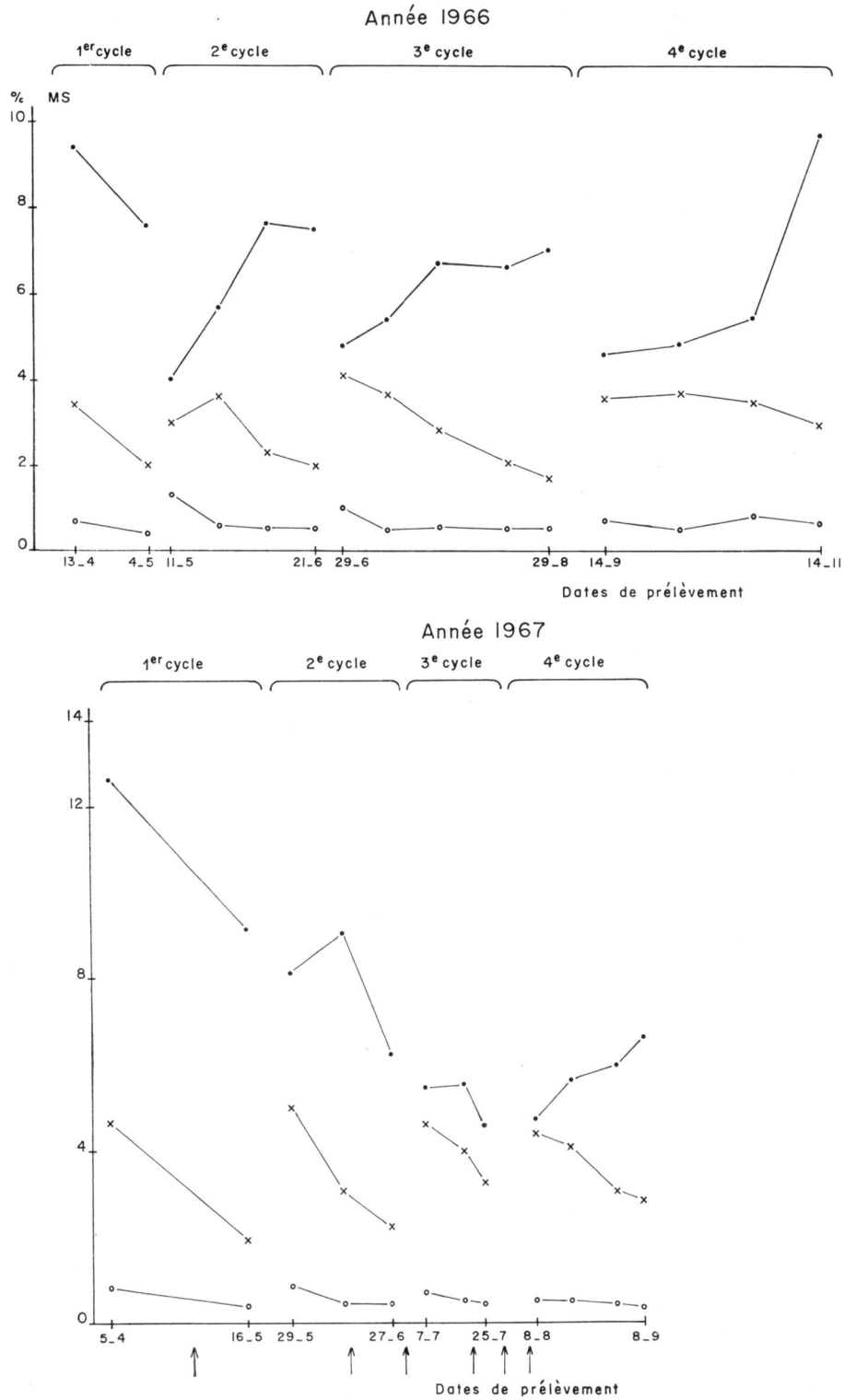



FIG. 7. — *Variations des glucides solubles totaux, de l'azote total et de l'azote soluble dans les parties aériennes de dactyle au cours de chaque cycle végétatif pendant deux années*

· —— glucides solubles totaux
× —— azote total
o —— azote soluble
↑ irrigations

2. 5. *Comparaison de la composition des parties aériennes, des plateaux de tallage et des racines.*

*A chaque coupe,* si l'on essaie de comparer les résultats obtenus d'une part sur les parties aériennes et d'autre part sur les plateaux de tallage et les racines, on est conduit aux constatations suivantes :

Les écarts observés entre la *composition minérale* des plateaux de tallage et des racines et celle des parties aériennes diffèrent très sensiblement suivant les éléments considérés. La teneur en K est toujours beaucoup plus faible dans les plateaux de tallage et les racines que dans les parties aériennes (environ 0,4 p. 100 contre 3 p. 100), il en est de même pour Mg (0,04 p. 100 contre 0,15 p. 100). Par contre, la différence dans la teneur en Ca est beaucoup moins importante, en moyenne on trouve 2 fois plus de Ca dans les parties aériennes. Le taux de P est identique et celui de Na est du même ordre de grandeur. Nous avons observé que les irrigations augmentent la quantité de Na, à la fois dans les racines et les parties aériennes, et celle de Mg seulement dans les racines.

Il en est de même pour la *composition protidique :* les teneurs en azote total sont toujours beaucoup plus faibles dans les plateaux de tallage et les racines que dans les parties aériennes (environ 0,7 p. 100 contre 2 à 3 p. 100) tandis que celles de l'azote soluble sont relativement voisines (0,2 à 0,3 p. 100 contre 0,4 p. 100).

En ce qui concerne les *glucides,* quelle que soit la fraction considérée (glucides solubles totaux, saccharose, sucres réducteurs) leur teneur est environ deux fois plus élevée dans les parties aériennes que dans les plateaux de tallage et les racines, exception faite comme nous l'avons déjà dit pour les racines de la zone 10-20 cm.

*Au fur et à mesure des coupes,* nous constatons une évolution dans la composition minérale des parties aériennes (K diminue, Ca augmente) tandis que dans les plateaux de tallage et les racines, la teneur en ces divers éléments reste à peu près constante.

La composition protidique et glucidique étant très liée aux facteurs climatiques et les coupes n'ayant pas toujours eu lieu exactement au même stade physiologique, son évolution dans les parties aériennes n'est pas absolument identique d'une année à l'autre. Cependant, nous pouvons remarquer que les variations des teneurs en protides sont en général assez limitées tandis que celles des glucides (principalement glucides solubles, totaux et réducteurs) sont importantes, surtout au cours de l'année 1967. Dans les plateaux de tallage et les racines, les variations de la composition protidique et glucidique sont beaucoup plus faibles mais vont toujours dans le même sens que celles des parties aériennes.

## CONCLUSION

Au cours de ces deux années d'expérimentation, l'étude des racines et des parties aériennes du dactyle a permis de recueillir un certain nombre de données sur leur composition chimique et biochimique.

L'examen des résultats concernant les plateaux de tallage et les racines a montré que la composition minérale, protidique et glucidique subit de faibles variations, d'une coupe à l'autre. Nous avons pu noter des différences sensibles dans la teneur de ces divers constituants, suivant les zones de racines considérées.

Les résultats obtenus sur les parties aériennes mettent en évidence l'importance du stade physiologique de la plante, du mode d'exploitation et du niveau de fertilisation sur leur composition. C'est ainsi que nos observations sur l'évolution de la composition minérale du dactyle ne sont pas toujours en accord avec celles mentionnées par certains auteurs mais les conditions culturales et les modes de prélèvement sont très différents et difficilement comparables.

Une comparaison de la composition de ces parties aériennes avec celle des plateaux de tallage et des racines, effectuée à chaque coupe, montre qu'il existe des différences dans la teneur des divers constituants, ces différences pouvant varier considérablement selon le constituant.

Enfin, dans nos conditions d'expérience, nous avons observé que l'application d'une forte fertilisation potassique avait peu d'influence sur la composition des parties souterraines alors qu'elle modifie l'équilibre des cations, la teneur en eau et la quantité de sucres réducteurs des parties aériennes.

*Reçu pour publication en juillet 1970.*

## SUMMARY


### STUDY OF VARIATIONS IN THE MINERAL, PROTEIN AND SUGAR COMPOSITION OF THE ROOTS AND AERIAL PARTS OF DACTYLIS (COCKSFOOT). (EFFECTS OF POTASSIUM-CONTAINING FERTILIZER)

During two consecutive years, using a *Dactylis* grown in the open as our subject, we studied the evolution of the chemical and biochemical composition of the roots and aerial parts in relation to the stage of growth and the use of potassium-containing fertilizer.

Research on samples of the tillering bases and roots taken at each cutting shows that the mineral composition (K, Ca, Mg, Na, P), the protein (total nitrogen, soluble nitrogen) and the sugars (total soluble and reducing carbohydrates, sucrose) remained more or less constant during the two years.

Analysis of the aerial parts sampled at reguler intervals during each vegetative cycle shows great variation in the amounts of the above constituents at different stages of growth. Development during the first cycle (reproductive cycle) is different from that in the other, essentially vegetative cycles. Climatic conditions also play an important part.

A comparison between the composition of the aerial parts and that of the tillering bases and roots reveals differences in their content of the various constituents.

Under our experimental conditions a strong application of potassium-containing fertilizer has little effect on the composition of the underground parts, whereas in the aerial parts it modifies the cation equlibrium, the water content and the quantity of reducing sugars.


## ZUSAMMENFASSUNG


### UNTERSUCHUNG DER VARIATIONEN IN DER MINERALSTOFF, DER EIWEISS- UND KOHLENHYDRATEN ZUSAMMENSETZUNG DER WURZEL UND DER OBERIRDISCHEN BESTANDTEILE DES KNAULGRASES (EINFLUSS DER KALIDÜNGUNG)

Auf einem im Freien kultivierten Knaulgras und während zwei aufeinanderfolgender Jahre, haben wir die Evolution cderhemischen und biochemischen Zusammensetzung der Wurzeln und der obserirdisehen Bestandteile mit Rücksicht auf das Wachstumstadium und die Kalidüngung untersucht.

Das Studium der nach jedem Schnitt entnommenen Schösslingsansätze und Wurzeln zeigt, dass die Mineralstoff (totaler Stickstoff, löslicher Stickstoff), Kohlenhydraten (lösliche, totale

Kohlenhydrate, Reduktionsmittel, Saccharose) Zusammensetzung fast beständig bleibt im Laufe dieser zwei Jahre.

Die Analyse der im Laufe jedes Wachstumszyklus in regelmässigen Zeitabständen entnommenen Luftbestandteile weist eine bedeutsame Aenderung des Gehaltes an diesen verschiedenen Grundstoffen in Abhängigkeit von der Wachstumsstufe auf. Die Evolution im Laufe des ersten Zyklus (Fortpflanzungszyklus) weicht von derjenigen der anderen, meist vegetativen Zyklen ab. Die Witterungsverhältnisse spielen auch eine wichtige Rolle.

Ein Vergleich zwischen der Zusammensetzung der Luftbestandteile und derjenigen der Schösslingsansätze und der Wurzeln zeigt Unterschiede im Gehalt an verschiedenen Grundstoffen.

Bei unseren Versuchsbedingungen hat eine starke Kalidüngung wenig Einfluss auf die Zusammensetzung der unterirdischen Bestandteile, während sie dagegen das Gleichgewicht der Kationen, den Wassergehalt und die Reduktionszuckermenge der Luftbestandteile verändert.

## РЕЗЮМЕ

*Изучение изменений минерального, протидного, и глюцидного сотава корней и надземной массы ежи (влияние калиевых удобрений).*

Елизавета ЛЕФЭВВР-ДРУЭ.

В течении двух последовательных лет, автор проследил на полевой культуре ежи, эволюцию химического и биохимического состава корней и надземной массы этого растения, в зависимости от стадии его вегетативного развития и удобрений калием.

Изучение плато кущения и корней из'ятых при каждом укосе показало что общий состав этих частей, как минеральный (K, Ca, Mg, Na, P), так протидный (общий азот, растворимый азот) и глюцидный (общие и растворимые глюциды, восстановители, сахароза), оставался приблизительно постоянным в течении этих двух лет. Анализ надземных частей, отобранных с регулярными интервалами во время каждого вегетативного цикла, указывает на сильные изменения содержания этих компонентов в зависимости от стадии роста растения. В течении первого цикла (цикл репродукции), эволюция протекает по иному, чем во время последующих циклов, в основном вегетативных. Климатические условия играют также важную роль.

Сравнение составов надземных частей и частей находящихся на линии кущения и корней, доказало существование у них разницы содержания различных компонентов. В условиях данного эксперимента, внесение в почву крупных доз калиевых удобрений мало влияло на состав подземных частей, но изменяло равновесное состояние катионов, содержание влаги и количество сахаров-восстановителей в надземных частях растения.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BAKER H. K., 1957. Studies on the root development of herbage plants. II. The effect of cutting on the root and stubble development, and herbage production, of spaced perennial rye-grass plants. *J. Brit. Grassl. Soc.*, **12**, 116-126.

BAKER H. K., GARDWOOD E. A., 1961. Studies on the root development of herbage plants. V. Seasonal changes in fructosan and soluble-sugar contents of cocksfoot herbage, stubble and roots under two cutting treatments. *J. Brit. Grassl. Soc.*, **16**, 263-267.

DELAS J., MOLOT C., 1967. Fertilisation potassique du vignoble bordelais. *Bull. A. F. E. S.*, **1**, 1-11.

DUTHION C., 1966. Réserve de potassium lentement libérable d'un sol de limon. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **52**, 90-97.

FLEMING G. A., COULTER B. S., 1963. *Mineral elements in pasture plants. Potassium in relation to grassland production*, 63-70.

GAUSSERES B., 1965. Étude des variations des teneurs en glucides cytoplasmiques et membranaires du dactyle au cours de l'année. *Ann. Biol. anim. Bioch. Biophys.*, **5** (3), 361-381.

GUÉGUEN L., 1959. Étude de la composition minérale de quelques espèces fourragères : influence du stade de développement et du cycle de végétation. *Ann. zootech.*, **8**, 245-268.

GUÉGUEN L., FAUCONNEAU G., 1960. Étude sur les variations des teneurs en matières azotées et en éléments minéraux du dactyle. *Ann. Zootech.*, **9**, 157-179.

LEFEBVRE J.-M., JOLIET E., 1967. Étude des variations de la composition protidique et glucidique des parties aériennes du dactyle (1re partie). *Ann. agron.*, **18** (5), 529-543.

LEFEBVRE J.-M., JOLIET E., 1968. Étude des variations de la composition protidique et glucidique des parties aériennes du dactyle : influence des fertilisations azotées (2e partie). *Ann. agron.*, **19** (3), 379-396.

MÉRIAUX S., PERREY C., 1961. Observations sur l'irrigation du dactyle en sol de réserve hydrique moyenne. *Ann. agron.*, **12** (1), 81-86.

SCHUFFELEN A. C., ROSANO M., VAN DIEST, 1967. La composition de la plante et la nutrition minérale. *Revue de la potasse*, section 3.

SOMOGYI M., 1952. Notes on sugar determination. *J. Biol. Chem.*, **195**, 19-23.

SPRAGUE V. G., SULLIVAN J. T., 1950. Reserve carbohydrates in orchard grass clipped periodically. *Plant Physiology*, **25**, 92-102.

TROUGHTON, 1957. *The underground organs of herbage grasses*, 49-68.

WAITE R., BOYD J., 1953. The water-soluble carbohydrates of grasses. II. Grasses cut at grazing height several times during the growing season. *J. Sci. Food. Agric.*, **4**, 257-261.

WAITE R., 1958. The water-soluble carbohydrates of grasses. IV. The effect of different levels of fertilizer treatment. *J. Sci. Food. Agric.*, **9**, 39-43.

WARNE L. B. G., 1936. New phytologist, 35, 403-417. *Revue de la Potasse*, octobre 1961. Section 3, 15e suite.

WILLIAMS T. E., BAKER H. K., 1957. Studies on the root development of herbage plants. I. Techniques of herbage root investigations. *J. Brit. Grassl. Soc.*, **12**, 49-55.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (4), 403-420.

# INFLUENCE D'ENFOUISSEMENTS RÉPÉTÉS DE TIGES DE MAÏS SUR LA MICROFLORE BACTÉRIENNE DES SOLS

J. RIVIÈRE*, Y. FROUARD* et G. CATROUX**
avec la collaboration technique de Mlle B. BERTHIER

**Laboratoire de Microbiologie,*
*Institut national agronomique, Paris*

***Station de Recherches de Microbiologie des Sols,*
*Centre de Recherches de Dijon*

*Institut national de la Recherche agronomique*

## RÉSUMÉ

L'étude d'un sol à monoculture de maïs a montré l'existence d'une microflore particulière très riche en Actinomycétales et adaptée à l'utilisation de l'acide paracoumarique et de l'acide oxalique qui sont contenus en quantités notables dans les tiges de maïs.

Ces faits ont été précisés à l'aide de sols provenant d'un champ d'expérimentation où des enfouissements massifs de tiges de maïs ont été effectués pendant sept ans. L'étude des microflores d'un sol témoin, du sol enrichi en tiges de maïs et de la rhizosphère de cette plante a donné les résultats suivants :

1° L'enrichissement du sol en tiges de maïs fait apparaître une microflore particulière. La présence de l'acide paracoumarique et de l'acide oxalique favorise la prolifération d'Actinomycétales productrices *in vitro* d'antibiotiques qui inhibent la croissance des *Arthrobacter* et des *Bacillus* constituant l'essentiel de la microflore du sol témoin. En outre, ces souches sont plus sensibles à l'acide paracoumarique que les Actinomycétales.

2° Dans la rhizosphère du maïs, on trouve surtout des bâtonnets Gram négatifs appartenant à trois genres : *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Acinetobacter*, résistants à l'acide paracoumarique qui sert de source de carbone et d'énergie à 16 p. 100 des souches.

3° L'acide paracoumarique et l'acide oxalique sont dégradés par une microflore spécialisée dans tous les cas.

Les rôles respectifs éventuels de la microflore du sol et de l'acide paracoumarique dans l'apparition des phénomènes de fatigue des sols en monoculture de maïs sont discutés.

## INTRODUCTION

Selon HENNEQUIN et JUSTE (1967), l'enfouissement des tiges de maïs s'accompagne d'une augmentation de la concentration du sol en acide paracoumarique. D'autre part, ces auteurs ont mis en évidence que le maïs en cours de développement

est beaucoup plus sensible que les graines à l'action phytotoxique de cet acide. L'hypothèse d'une accumulation d'acide paracoumarique provenant de la décomposition des tiges de maïs qui sont régulièrement enfouies peut être avancée. Cette accumulation pourrait être l'un des facteurs qui sont à l'origine des irrégularités de croissance et des baisses de rendements qui caractérisent la fatigue de certains sols du sud-ouest de la France soumis durant plusieurs années à la monoculture du maïs.

On a donc cherché à préciser le rôle éventuel de la microflore du sol dans l'apparition de ces phénomènes de « fatigue ». Pour cela, on a comparé, dans un travail préliminaire, les microflores d'un sol en monoculture de maïs depuis douze années, présentant des symptômes de « fatigue », et d'un sol voisin, en « friche », considéré comme sol de référence. Parallèlement, à l'aide de sols provenant d'un champ d'expérimentation, on a étudié plus en détail les microflores d'un sol non cultivé, non fertilisé (sol témoin), et d'un sol également non cultivé non fertilisé mais ayant reçu des quantités importantes de tiges de maïs pendant sept années (sol essai). On a, de plus, étudié la microflore rhizosphérique du maïs.

L'acide paracoumarique peut être utilisé par les microorganismes comme source de carbone et d'énergie, il peut aussi avoir une action bactériostatique selon HATSUDA (1965) et son importance dans l'établissement des différentes microflores a été étudiée sous ces deux aspects.

Enfin, on a cherché à préciser les interrelations entre les microflores du sol témoin et du sol ayant reçu les tiges de maïs.

Par ailleurs, étant donné que les tiges de maïs contiennent des quantités relativement importantes d'acide oxalique et que cet acide est vraisemblablement présent dans les excrétions radicellaires (ROVIRA et coll., 1967), on a également étudié le rôle de ces diverses microflores dans la biodégradation de l'acide oxalique.

## MATÉRIEL ET TECHNIQUES

### 1. *Caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés*

Dans une étape préliminaire, deux échantillons de sols de « Touya » (sol brun acide) provenant de Serres-Castet (Basses Pyrénées) ont été étudiés. Le premier est un sol de landes en friche, n'ayant par conséquent reçu aucun engrais ou amendement ; le second sol est de même origine, cultivé en maïs depuis douze années et recevant des engrais et des amendements minéraux en quantité abondante.

L'essentiel de ce travail a porté sur un champ d'expérimentation établi en 1960, au Domaine I. N. R. A. de la Grande-Ferrade (33 - Pont-de-la-Maye), sur un ancien sol de vigne, à texture sableuse, originellement très pauvre en matière organique. Ce dispositif avait été mis en place pour suivre l'influence de différentes sources de matières organiques sur la minéralisation de l'azote dans les conditions particulières d'un sol sableux sous climat atlantique (DELAS, 1963).

Les parcelles « essai » de ce dispositif, que nous avons utilisées, ont reçu chaque année entre le 15 décembre et le 15 janvier, pendant sept années, une quantité de tiges de maïs telle que l'apport cumulé de matière fraîche est équivalent à 520 tonnes à l'hectare, soit une quantité très supérieure à celle correspondant à l'enfouissement des résidus de récolte du maïs. Les fragments de tiges de maïs mesurent de 4 à 5 cm de long et sont enfouis superficiellement à la bêche. Les parcelles « témoin » ne reçoivent strictement rien.

L'étude la microflore rhizosphérique du maïs a été effectuée à l'aide de semis de maïs en pots remplis de terre provenant des parcelles « témoin » et portés en serre jusqu'au stade 4-5 feuilles.

Les principales caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés figurent dans le tableau I.

On remarque, pour les deux types de sols, que les parcelles ayant reçu des tiges de maïs sont plus riches en acide paracoumarique que les parcelles « témoin ». Ces résultats déjà cités par

HENNEQUIN et JUSTE (1967) s'expliquent par le fait que l'on retrouve des quantités notables de cet acide dans les résidus de récolte de maïs selon GUENZI et MCCALLA (1966 *a*).

Par ailleurs, JUSTE (1970) a montré que l'hydrolyse alcaline (NaOH 2N, 24 heures) des tiges de maïs libère 9,9 mg d'acide paracoumarique par gramme de tiges sèches, l'hydrolyse alcaline (NaOH 2N) d'un extrait aqueux de tiges de maïs ne libérant que 0,28 mg d'acide paracoumarique par gramme de tiges sèches. Enfin, l'analyse a montré que les tiges de maïs contiennent par gramme de matière sèche, 14 mg d'acide oxalique, 4,3 mg d'acide malique et 1,5 mg d'acide citrique.

TABLEAU I

*Caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés*

| | Sols de Serres-Castet | | Sols de la Grande Ferrade | |
|---|---|---|---|---|
| | Sol en friche | Sol en monoculture de maïs | Sol témoin | Sol essai |
| *P. 100 de terre fine* | | | | |
| Argile < 2 μ | 20,2 | 17,9 | 5,5 | 5,5 |
| Limon (2-20μ) | 36,1 | 37,6 | 5,6 | 5,6 |
| Limon (20-50 μ) | 25,0 | 27,5 | 5,3 | 5,3 |
| Sable fin | 6,0 | 8,0 | 8,1 | 8,1 |
| Sable grossier | 3,0 | 3,5 | 72,9 | 72,9 |
| Matière organique | 7,1 | 3,9 | 0,9 | 1,3 |
| *P. 1000 de terre fine* | | | | |
| Azote | 2,83 | 1,86 | 0,38 | 0,53 |
| Carbone | 41,6 | 22,9 | 5,2 | 7,5 |
| $P_2O_5$ | 0,014 | 0,150 | 0,203 | 0,167 |
| $K^+$ | 0,026 | 0,053 | 0,026 | 0,052 |
| $Ca^{++}$ | 0,060 | 0,298 | 0,643 | 0,636 |
| $Mg^{++}$ | 0,007 | 0,039 | 0,022 | 0,030 |
| pH eau | 4,8 | 5,7 | 7,2 | 7,0 |
| Acide paracoumarique p.p.m. de terre fine | 8,4 | 24 | traces | 4,7 |

### 2. *Isolement des souches*

Les prélèvements de sol et de rhizosphère et leur analyse microbiologique ont été effectués d'après les techniques déjà citées (RIVIÈRE, 1963). Nous avons également utilisé le milieu de SINGH-VERMA (1967) pour le dénombrement et l'isolement des bactéries, et celui de PORTER et coll. (1960), dans le cas des Actinomycétales.

### 3. *Identification des souches*

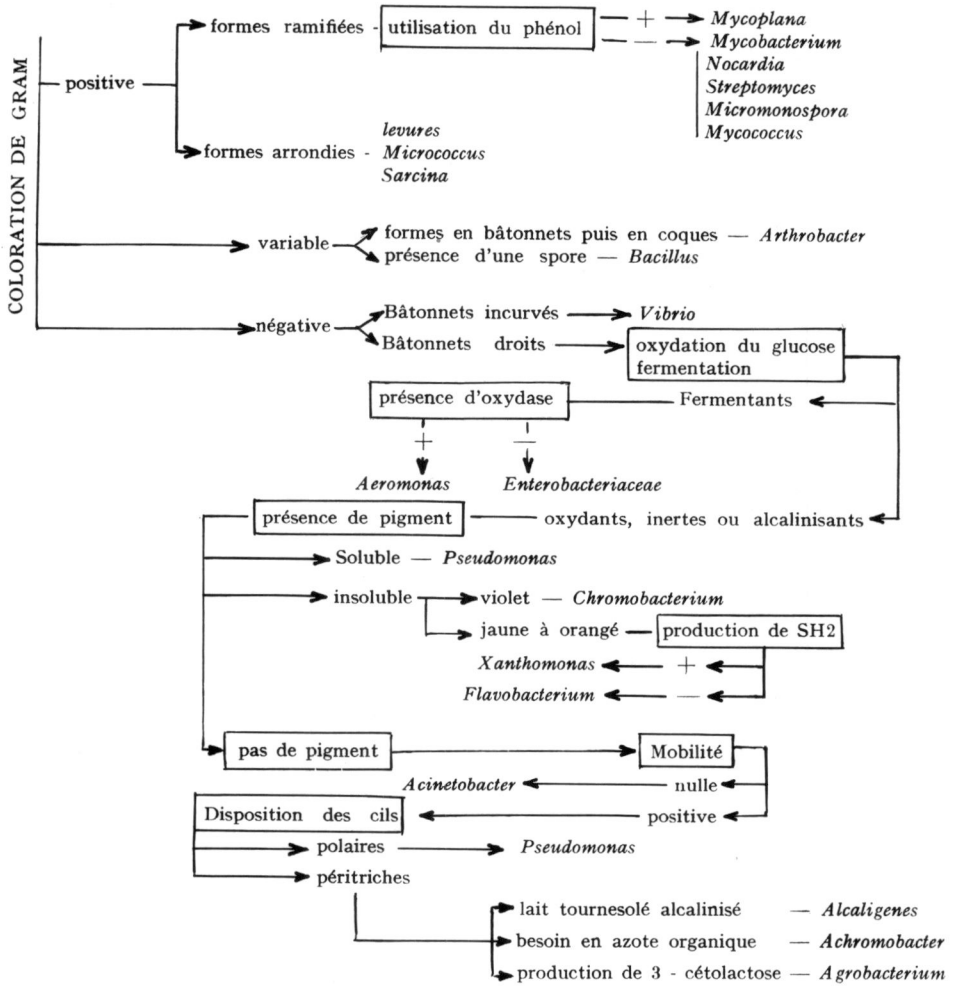
Par suite de l'évolution rapide des techniques d'identification, il a été nécessaire de modifier le schéma proposé dans une publication antérieure (RIVIÈRE, 1963). Le tableau 2 donne une clef d'identification simplifiée en accord avec celle de l'IRCHA (1970).

Les formes ramifiées et les formes arrondies, ainsi que les bactéries appartenant au genres *Arthrobacter*, *Bacillus* et *Vibrio* s'identifient aisément en utilisant les caractères déjà cités (RIVIÈRE, 1963).

En ce qui concerne les bâtonnets droits ou les coccobacilles Gram-négatifs que l'on retrouve surtout dans la rhizosphère, on peut retenir les caractères suivants propres aux différents genres autres que ceux appartenant à la famille des Enterobacteriaceae qui est bien connue.

TABLEAU 2

*Schéma d'identification des souches bactériennes*




*Aeromonas* fermentation du glucose, présence d'une oxydase.

*Chromobacterium* bâtonnets mobiles, ayant un pigment violet (SNEATH, 1956).

*Pseudomonas* bâtonnets pigmentés ou non, mobiles à l'aide de flagelles polaires, ayant une source d'énergie respiratoire. Certaines souches peuvent utiliser la dénitrification comme mécanisme respiratoire anaérobie (STANIER et coll. 1966).

*Alcaligenes* bâtonnets mobiles à l'aide de cils péritriches, contenant une oxydase, utilisant les citrates, alcalinisant le lait tournesolé (HENDRIE et coll. 1964).

*Achromobacter* bâtonnets mobiles au moyen de cils péritriches, nécessitant de l'azote organique (THORNLEY, 1967).

*Agrobacterium* bâtonnets mobiles au moyen de cils péritriches produisant du 3-cétolactose (DELEY *et al.*, 1966).

*Acinetobacter* bâtonnets immobiles (THORNLEY, 1967).

*Xanthomonas* bâtonnets mobiles à l'aide de cils polaires, ayant un pigment jaune insoluble, produisant de l'hydrogène sulfuré.

*Flavobacterium* bâtonnets mobiles (ou mobiles à l'aide de cils péritriches) ne produisant pas d'hydrogène sulfuré.

Il faut noter que, si cette identification est loin d'être totalement satisfaisante, elle n'en présente pas moins, un moyen commode et relativement simple d'aborder un problème d'écologie microbienne.

Les techniques suivantes ont été utilisées :

a) *Mobilité.*

On utilise la technique de BALL et SELLERS (1966) qui permet, en outre, de mettre en évidence la liquéfaction de la gélatine, la réduction des nitrates et le dégagement d'azote gazeux.

b) *Sporulation.*

Elle est mise en évidence d'après la méthode de KIM et NAYLOR (1966).

c) *Production d'hydrogène sulfuré.*

On emploie la technique de VERON et GASSER (1963).

d) *Production de 3-cétolactose.*

Elle se fait sur une plaque de gélose nutritive lactosée (BEAUD et MANIGAULT, 1966).

e) *Dénitrification* (STANIER et coll. *1966*).

Le milieu contient : extrait de levure (Difco) : 5 g ; glycérol : 10 g ; $KNO_3$ : 1 g ; solution saline standard (Winogradsky) : 50 ml ; gélose (Bacto-agar Difco) : 1 g ; eau distillée, q.s.q. 1 000 ml. Il est réparti à raison de 5 ml et de 10 ml par tube 18 × 180 mm. On stérilise 20 mn à 118°C. La souche étudiée est d'abord ensemencée dans un tube contenant 5 ml de milieu. Après 24 h d'incubation à 30°C, on transfère une anse dans un tube de 10 ml. On verse 3 ml de gélose à 15 g p.litre fondue et ramenée à 45°. On incube 1 à 5 jours à 30°C, lorsqu'il y a dénitrification le bouchon de gélose se soulève.

f) *Utilisation du phénol.*

On prépare le milieu suivant qui contient : $(NH_4)_2SO_4$ : 6 g ; $K_2HPO_4$ : 0,5 g ; $KH_2PO_4$ : 0,5 g ; $MgSO_4$, 7 $H_2O$ : 0,2 g ; $MnSO_4$, $H_2O$ : 2,1 g ; $CaCl_2$, $2H_2O$ : 0,1 g ; $FeCl_3$ : 0,01 g ; NaCl : 0,1 g ; Solution d'oligo-éléments : 1 ml ; eau distillée : q.s.p. 900 ml.

Après stérilisation (15 mn 118°C), on ajoute aseptiquement 100 ml d'une solution de phénol à 10 p. 100 (poids/volume) stérilisée à l'autoclave. Le pH est ajusté à 7,0 avec de la soude normale stérile. On répartit dans des fioles coniques de 160 ml en couches de moins de 1 cm d'épaisseur. On ensemence avec la souche étudiée et l'on incube à 28°C. Il faut au moins trois transferts successifs avant d'affirmer que la croissance est positive avec utilisation du phénol.

g) *Nécessité d'azote organique pour la croissance.*

On utilise le même milieu minéral que dans le cas de l'utilisation du phénol, mais à la place de cette substance, on ajoute dans le milieu 10 g/l de glucose stérilisé par filtration. Il faut également trois transferts successifs pour affirmer que la croissance est positive avec de l'azote minéral.

h) *Recherche de l'oxydase et de la cytochrome oxydase.*

On utilise la technique de l'IRCHA (1970).

4. *Comportement des souches vis-à-vis de l'acide paracoumarique et de l'acide oxalique*

a) *Utilisation de l'acide paracoumarique.*

On emploie la technique décrite par CATROUX *et al.* (1969).

b) *Résistance à l'acide paracoumarique.*

On prépare trois milieux gélosés à concentration double (30 g de gélose par litre) dans un tampon phosphate M/20 à pH 7,0.

Le milieu 1 a la même constitution que celui qui sert à mettre en évidence l'utilisation de l'acide paracoumarique.

Le milieu 2 contient en plus 1 g de glucose, 50 mg d'extrait de levure et 100 ml d'extrait de terre.

Le milieu 3 est réservé aux souches auxotrophes. Il contient : Bactotryptone (Difco) : 10 g ; NaCl : 5 g ; extrait de viande (Difco) : 2 g ; extrait de levure (Difco) : 1 g ; glucose : 2 g ; eau distillée q.s.p. 1 000 ml ; pH 7,0. Ces milieux sont répartis à raison de 10 ml par tube 18 × 180 mm et stérilisés. On ajoute alors aseptiquement des quantités données d'acide paracoumarique stéri-

lisé par filtration (solution à 2 g par litre dans un tampon phosphate M/20 à pH 7,0), de façon à obtenir des concentration finales de 500 et 1 000 p.p.m. Les milieux sont répartis dans des boîtes de Pétri. Après solidification, les souches étudiées sont ensemencées à la surface de ces différents milieux en déposant une anse d'une suspension épaisse, cinq souches par plaque, régulièrement espacées. Après incubation à 30°C, on compare la croissance de chaque colonie avec celle d'un milieu témoin ayant la même teneur en glucose, mais sans acide paracoumarique.

c) *Utilisation de l'acide oxalique.*

On emploie la technique de DOMMERGUES et BECK (1966).

Le milieu contient $(NH_4)_2SO_4$ : 0,5 g ; $NaNO_3$ : 0,5 g ; $K_2HPO_4$ : 0,5 g ; $MgSO_4$, 7 $H_2O$ : 0,5 g ; $CaCl_2$ : 0,2 g ; oxalate ferrique (K and K Laboratories) : 1 g ; eau distillée q.s.p. 1 000 ml.

On dissout à l'ébullition. On ajuste le pH à 6,0. On centrifuge. Après centrifugation et filtration, le milieu est gélosé à raison de 15 g/l et coulé en plaques après stérilisation. L'ensemencement se fait en déposant une anse d'une suspension épaisse de chaque souche à la surface de la plaque. Les souches utilisant l'acide oxalique donnent un dépôt d'oxyde de fer de couleur rouille autour des colonies.

Quand on utilise le même milieu liquide, l'utilisation de l'acide oxalique se manifeste par une pellicule rouille d'oxyde de fer à la surface.

5. *Recherche des acides organiques dans les tiges de maïs*

On utilise une technique voisine de celle décrite par ROUX et LESAINT (1959).

6. *Recherche des acides phénols libres dans les sols étudiés*

On utilise la technique décrite par HENNEQUIN et JUSTE (1967).

7. *Mise en évidence de l'action antagoniste des Actinomycétales du sol « essai » sur les bactéries du sol témoin*

On prépare des plaques de glucose-asparagine-agar additionnées d'extrait de levure et de bactotryptone Difco.

Chaque souche d'Actinomycétale est ensemencée suivant un diamètre de la plaque. Après 6 jours d'incubation à 30°, on ensemence les souches à tester en stries perpendiculaires. Le degré d'inhibition est considéré comme faible lorsque la zone d'inhibition est inférieure à 1 cm et comme fort lorsque la zone d'inhibition est supérieure à 1 cm.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

Nous examinerons successivement les résultats concernant l'étude préliminaire sur sol à monoculture de maïs, puis les résultats concernant le champ d'expérimentation de la Grande-Ferrade, soit dans ce dernier cas :

les caractéristiques microbiologiques des sols étudiés, l'utilisation de l'acide paracoumarique et de l'acide oxalique comme source de carbone et d'énergie, la résistance des souches aux diverses doses d'acide paracoumarique, et la production de substance antibiotiques par les Actinomycètes.

### A. — *Étude préliminaire sur sol à monoculture de maïs*

1. *Caractéristiques microbiologiques des sols étudiés.*

Ces caractéristiques figurent dans le tableau 3. Alors que le sol de « Serres-Castet en monoculture de maïs » contient $6{,}2 \cdot 10^7$ microorganismes revivifiables par gramme, le sol de « Serres-Castet en friche » n'en contient que $3 \cdot 10^6$.

De plus, la répartition des genres mise en évidence dans le tableau 4 est très différente, le sol à monoculture de maïs étant beaucoup plus riche en Actinomycètes que le sol de référence.

TABLEAU 3

*Caractéristiques microbiologiques du sol de « Serres-Castet en friche » et du sol de « Serres-Castet en monoculture de maïs »*

| Groupes de Microorganismes | Sol en friche | Sol en monoculture de maïs |
|---|---|---|
| Microflore totale | 3 000 000 | 62 000 000 |
| Champignons | 1 200 | 37 000 |
| Fixateurs aérobies *(Azotobacter)* | 0 | 0 |
| Fixateurs anaérobies | 0 | 35 000 |
| Protéolytiques | 140 000 | 90 000 |
| Ammonifiants | 75 000 | 11 000 000 |
| Ferments nitreux | 350 | 500 |
| Ferments nitriques | 500 000 | 800 000 |
| Dénitrifiants | 2 500 | 9 000 |
| Amylolytiques | 450 000 | 2 500 000 |
| Cellulolytiques aérobies | 4 500 | 900 |

TABLEAU 4

*Répartition des genres bactériens dans la microflore des sols de « Serres- Castet »*

| | *Bacillus* | *Arthrobacter* | Bâtonnets gram-négatifs | Actinomycètes | Divers |
|---|---|---|---|---|---|
| Sol en friche | 60 | 11,5 | 20 | 5 | 3,5 |
| Sol en monoculture de maïs | 16,1 | 18,3 | 9,7 | 55,9 | 0 |

2. *Utilisation de l'acide paracoumarique et de l'acide oxalique.*

4,5 p. 100 des souches isolées du sol de « Serres-Castet en friche » sont susceptibles d'utiliser l'acide paracoumarique comme source de carbone et d'énergie tandis que 25,8 p. 100 de celles provenant du sol de « Serres-Castet en monoculture de maïs » ont cette propriété.

L'acide oxalique est métabolisé par 12,3 p. 100 des souches provenant du sol en friche et par 36,5 p. 100 de celles provenant du sol à monoculture de maïs.

## B. — *Sols provenant du champ d'expérimentation de la Grande-Ferrade et Rhizosphère du maïs*

1. *Caractéristiques microbiologiques des sols étudiés.*

La répartition des souches en fonction de leur origine est résumée dans les tableaux 5 et 6. On a isolé et purifié 150 souches du sol témoin, 212 souches du sol essai et 381 souches de la rhizosphère.

Le sol témoin a une microflore constituée presque exclusivement de bactéries appartenant à deux genres, *Bacillus et Arthrobacter*, ce qui s'explique par le fait qu'il contient peu de matières organiques (0,9 p. 100).

TABLEAU 5

*Caractéristiques bactériologiques des sols étudiés au domaine de la Grande-Ferrade*

| Types de sols | Microflore totale (par g de poids sec) | Groupes bactériens en p. 100 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | *Bacillus* | *Arthrobacter* | Bâtonnets gram-nég. | Actinomycètes | Divers |
| Témoin ..... | 950 000 | 58,8 | 26,1 | 4,0 | 8,1 | 3,0 |
| Essai ..... | 1 370 000 | 43,7 | 28,8 | 4,3 | 21,3 | 2,4 |
| Rhizosphère ... | 25 000 000 | 8,2 | 19,0 | 69,5 | 1,8 | 1,5 |

TABLEAU 6

*Répartition en genres des bâtonnets Gram-négatifs dans la rhizosphère*
(les résultats sont exprimés en pourcentage)

| Genres | % | Genres | % | Genres | % |
|---|---|---|---|---|---|
| *Pseudomonas* | 41 | *Aeromonas* | 7 | *Xanthomonas* | 1 |
| *Flavobacterium* | 32 | *Chromobacterium* | 2 | *Escherichia* | 1 |
| *Acinetobacter* | 14 | *Agrobacterium* | 2 | *Citrobacter* *Enterobacter* | |

Dans le sol-essai qui ne contient pas beaucoup plus de germes, malgré un gros apport annuel de tiges de maïs, on voit apparaître une quantité importante d'Actinomycètes représentés surtout par des souches du genre *Streptomyces* d'après PORTER et coll. (1962).

Le grand nombre de microorganismes dans la Rhizosphère s'explique par la présence d'importantes excrétions radicellaires contenant, entre autres, des acides aminés et des facteurs de croissance (TARDIEUX et coll., 1960). De plus, les bâtonnets Gram-négatifs, en très petit nombre dans le sol témoin et dans le sol essai représentent dans la rhizosphère 70 p. 100 des souches identifiées. On retrouve surtout des bactéries appartenant à trois genres, *Pseudomonas*, *Flavobacterium* et *Acinetobacter*.

Dans les trois cas étudiés, les microorganismes classés dans le groupe intitulé divers (coques, levures, souches non identifiées) ne représentent qu'un faible pourcentage du nombre total des souches isolées.

Il apparaît donc que les trois sols hébergent chacun une microflore caractéristique.

2. *Utilisation de l'acide paracoumarique et de l'acide oxalique.*

Les résultats sont résumés dans les tableaux 7, 8 et 9. Dans le sol témoin, 16 p. 100 des souches isolées sont capables d'utiliser l'acide paracoumarique, alors que 28 p. 100 de celles provenant du sol-essai ont cette propriété. Parmi les souches isolées de la

TABLEAU 7

*Utilisation de l'acide paracoumarique et de l'acide oxalique comme source de carbone et d'énergie par les souches isolées* (exprimée en % du nombre total des souches)

| Types de sols | Source de Carbone et d'énergie utilisée | | |
|---|---|---|---|
| | acide paracoumarique | acide oxalique | l'un et l'autre de ces deux acides |
| Témoin | 16 | 14 | 5 |
| Essai | 28 | 20 | 7 |
| Rhizosphère | 17 | 37 | 12 |

TABLEAU 8

*Utilisation de l'acide paracoumarique par les divers groupes bactériens* (les résultats sont exprimés en pourcentage)

| Groupes bactériens | Témoin | | | Essai | | | Rhizosphère | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | G % | A % | T % | G % | A % | T % | G % | A % | T % |
| *Bacillus* | 6 | 22 | 3,5 | 7 | 12 | 3,4 | 10 | 7 | 1 |
| *Arthrobacter* | 30,5 | 52 | 8 | 48,5 | 51 | 14,3 | 3 | 9 | 1,5 |
| Bâtonnets Gram-négatifs | 25 | 3 | 0,5 | 23,5 | 3 | 0,8 | 16 | 76 | 13 |
| Actinomycétales | 25 | 13 | 2 | 38,5 | 31 | 8,7 | 0 | 0 | 0 |
| Divers | 28,5 | 10 | 2 | 20,5 | 3 | 0,8 | 8 | 8 | 1,5 |
| Total | | 100 | 16 | | 100 | 28 | | 100 | 17 |

G % = Pourcentage des souches du groupe utilisant l'acide paracoumarique.
A % = Pourcentage des souches du groupe utilisant l'acide paracoumarique par rapport au total des souches actives.
T % = Pourcentage des souches du groupe utilisant l'acide paracoumarique par rapport au nombre total des souches isolées.

rhizosphère, 17 p. 100 peuvent utiliser l'acide paracouramique. Ces résultats peuvent s'expliquer si l'on admet que l'apport d'acide paracoumarique est surtout dû aux résidus (tiges de maïs) qui sont introduits dans le sol-essai (GUENZI et MCCALLA, 1966 *a*), bien que les racines en excrètent de petites quantités (HATSUDA et coll., 1965).

Dans le sol témoin et dans le sol-essai, les souches responsables de la dégradation de l'acide paracoumarique (tabl. 6) sont principalement des *Arthrobacter*. Cependant, les Actinomycétales jouent aussi un rôle important dans le sol-essai, puisqu'elles constituent 31 p. 100 des souches actives. Au contraire, dans la Rhizosphère, ce sont les bâtonnets Gram-négatifs qui constituent l'ensemble des souches actives.

TABLEAU 9

*Utilisation de l'acide oxalique par les divers groupes bactériens*
(les résultats sont exprimés en pourcentage)

| Groupes bactériens | Témoin | | | Essai | | | Rhizophère | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | G % | A % | T % | G % | A % | T % | G % | A % | T % |
| *Bacillus* | 6 | 26 | 3,5 | 8 | 19 | 3,5 | 38 | 8 | 3 |
| *Arthrobacter* | 27 | 52 | 7 | 12 | 19 | 3,5 | 22 | 12 | 4,5 |
| Bâtonnets Gram-négatifs | — | — | — | 6 | 2 | 0,5 | 41 | 72 | 27 |
| Actinomycétales | 31 | 18 | 3 | 52 | 58 | 11,5 | 58 | 3 | 1 |
| Divers | 7 | 4 | 0,5 | 6 | 2 | 1 | | 5 | 1,5 |
| Total | | 100 | 14 | | 100 | 20 | | 100 | 37 |

G % = Pourcentage des souches du groupe utilisant l'acide oxalique.
A % = Pourcentage des souches du groupe utilisant l'acide oxalique par rapport au total des souches actives
T % = Pourcentage des souches du groupe utilisant l'acide oxalique par rapport au nombre total des souches isolées.

On retrouve un phénomène voisin dans le cas de l'acide oxalique (tabl. 7), où cependant les Actinomycétales jouent le plus grand rôle pour la dégradation de cet acide dans le sol-essai.

Il y a donc, en fonction du cas étudié, un changement important dans la microflore responsable de la dégradation de ces deux acides.

3. *Résistance des souches à l'acide paracoumarique.*

En fonction de la concentration en acide paracoumarique, les souches peuvent être stimulées, faiblement inhibées ou fortement inhibées. Quand on considère la résistance globale des souches à l'acide paracoumarique, la figure 1 fait ressortir qu'il y a une progression très nette entre le sol témoin, le sol-essai et la rhizosphère. En effet, pour 500 p.p.m. d'acide paracoumarique, les souches fortement inhibées représentent :

70 p. 100 dans le sol témoin,
51 p. 100 dans le sol-essai,
18 p. 100 dans la rhizosphère.

Avec 1 000 p.p.m. d'acide paracoumarique, les pourcentages respectifs sont de 87 p. 100, 76 p. 100, 64 p. 100.

En ce qui concerne la stimulation, le pourcentage des souches réagissant favorablement à de fortes doses d'acide paracoumarique est plus important dans la rhizosphère. Ainsi à 500 p.p.m., on en trouve :

4 p. 100 dans le sol témoin,
7 p. 100 dans le sol-essai,
23 p. 100 dans la rhizosphère.

Avec 1 000 p.p.m., ces pourcentages respectifs sont : 2 p. 100, 7 p. 100, 14 p. 100.

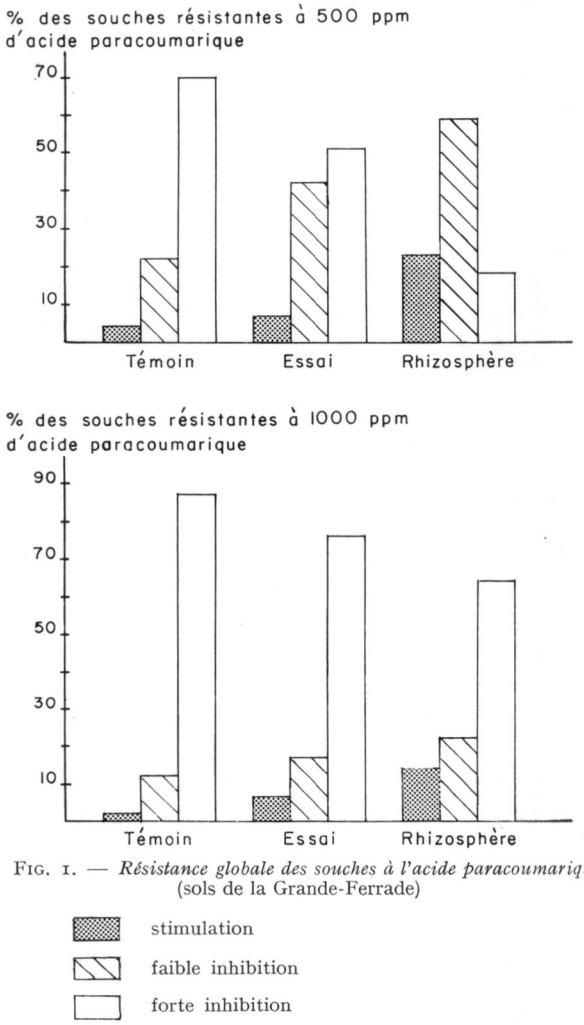



FIG. 1. — *Résistance globale des souches à l'acide paracoumarique* (sols de la Grande-Ferrade)

Si l'on considère la résistance des souches utilisant l'acide paracoumarique à de fortes doses de cet acide (fig. 2), on constate qu'il y a une progression du même ordre, croissante, entre le sol témoin, le sol essai et la rhizosphère. Mais la résistance des

souches utilisant l'acide paracoumarique est plus élevée que celle de l'ensemble des souches isolées.

Par exemple, à 500 p.p.m. les souches fortement inhibées représentent :

50 p. 100 dans le sol témoin,
40 p. 100 dans le sol-essai,
10 p. 100 dans la rhisozphère.

A 1 000 p.p.m., les pourcentages respectifs sont : 75 p. 100, 65 p. 100, 41 p. 100.

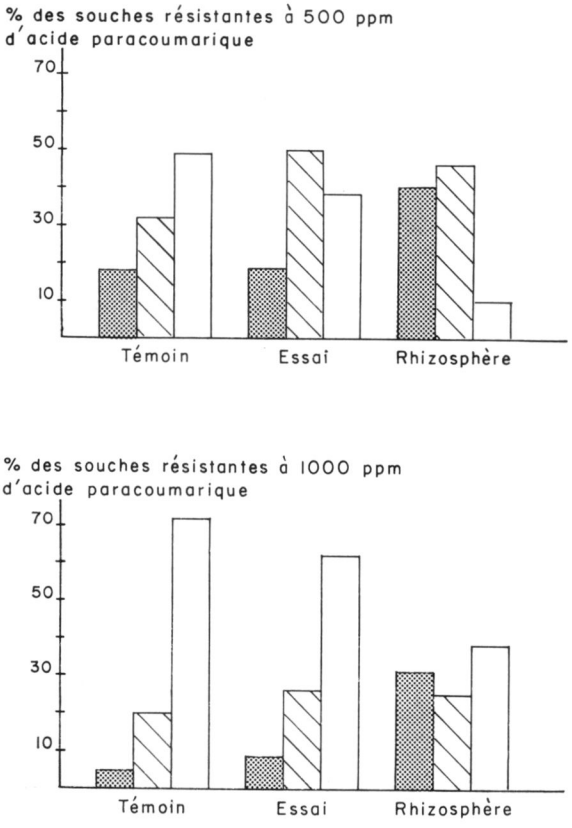



FIG. 2. — *Résistance des souches utilisant l'acide paracoumarique à de fortes doses de cet acide* (Sols de la Grande-Ferrade).

Que peut-on déduire de ces résultats, en ce qui concerne l'établissement d'une microflore caractéristique dans un sol où l'on enfouit des tiges de maïs, source d'acide paracoumarique ? Une réponse partielle nous est fournie en examinant le tableau 6

et la figure 3 qui représente la résistance à l'acide paracoumarique des souches isolées du sol témoin comparée à celle des souches isolées de la rhizosphère.

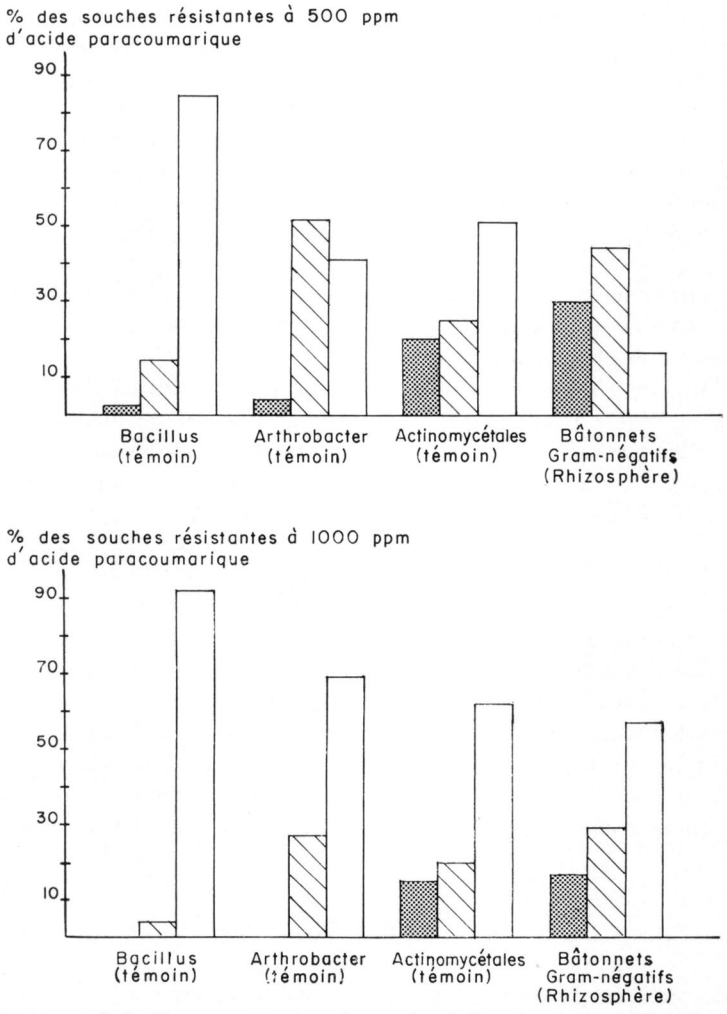



FIG. 3. — *Résistance à l'acide paracoumarique des souches isolées du sol témoin* (Bacillus, Arthrobacter Actinomycétales) *comparée à celle des souches isolées de la rhizosphère* (Bâtonnets Gram-négatifs)(Sols de la Grande-Ferrade).

stimulation

faible inhibition

forte inhibition

Dans le sol témoin, les bactéries du genre *Bacillus* représentent le groupe bactérien le plus important, mais 6 p. 100 seulement des souches de ce groupe utilisent l'acide paracoumarique. En outre, elles sont très sensibles à cet acide, puisque 86 p. 100 des souches sont fortement inhibées jusqu'à 500 p.p.m. C'est pourquoi, dans le sol-

essai enrichi en matière organique métabolisable (tiges de maïs), on ne retrouve pas plus de ces bactéries que dans le sol témoin.

Il est même vraisemblable que les colonies revivifiables proviennent de spores

En ce qui concerne les *Arthrobacter*, le pourcentage des souches utilisant l'acide paracoumarique est élevé (30,5 p. 100). Ils sont également plus résistants, ce qu. explique le rôle qu'ils jouent dans le sol essai pour l'élimination de cet acide (51 p. 100 du total des souches actives, ce qui est en accord avec les observations de MULLAKHANBHAI (1966) et STEVENSON (1967)). Mais le phénomène le plus remarquable concerne les Actinomycétales. Peu nombreux dans le sol témoin, ces microorganismes sont fortement stimulés dans le sol-essai, puisqu'ils sont capables d'utiliser l'acide paracoumarique (25 p. 100 des souches du groupe) et qu'ils résistent bien aux doses élevées.

Ainsi la présence d'acide paracoumarique dans les résidus de maïs enfouis dans un sol pourrait expliquer le maintien des *Arthrobacter* et la stimulation des Actinomycétales que l'on observe après un certain temps.

En ce qui concerne les bâtonnets Gram-négatifs de la rhizosphère, on s'aperçoit qu'ils utilisent l'acide paracoumarique (16 p. 100 des souches du groupe) et qu'ils sont encore plus résistants que les Actinomycétales du sol témoin. Il y aurait donc dans la rhizosphère du maïs où les bâtonnets Gram-négatifs sont stimulés par les excrétions radicellaires, une sélection des germes résistants à l'acide paracoumarique.

4. *Production de substances antibiotiques par les Actinomycétales.*

Les Actinomycétales isolés du sol-essai produisent des substances antibiotiques qui inhibent la croissance de 66 p. 100 des souches d'*Arthrobacter* et de 40 p. 100 des souches de *Bacillus* isolées du sol témoin. L'augmentation du nombre d'Actinomycétales dans le sol essai, qui est liée à la présence de matières organiques (WAKSMAN, 1959) pourrait également être liée à leur résistance à l'acide paracoumarique et à la production de substances antibiotiques par ces espèces, production qui a été mise en évidence *in vitro*. Ce sont d'ailleurs les souches d'Actinomycétales qui utilisent l'acide paracoumarique et l'acide oxalique qui produisent le plus de substances antibiotiques.

## CONCLUSION

L'étude préliminaire d'un sol soumis depuis douze années à la monoculture de maïs a permis de mettre en évidence une microflore particulière, très riche en Actinomycétales (55,9 p. 100) et semblant s'être adaptée à l'utilisation de l'acide paracoumarique et de l'acide oxalique. Ces faits ne semblent pas liés à une différence de fertilisation ou d'amendement puisqu'ils ont été confirmés par l'étude d'un sol provenant d'un champ d'expérimentation où des enfouissements répétés de tiges de maïs ont été effectués sans apport d'engrais.

Le rôle de l'acide paracoumarique dans l'établissement d'une telle microflore peut être résumé de la manière suivante :

— par rapport au sol témoin, un tel sol se caractérise par un apport de matière organique, sous forme de tiges de maïs, équivalent à 120 tonnes de matière sèche par hectare, en apports cumulés sur sept années.

L'hydrolyse alcaline de l'extrait aqueux de tiges de maïs nous indique quelle quantité d'acide paracoumarique peut être facilement libérée dans le sol sans qu'il y ait dégradation avancée des tiges de maïs enfouies. Cette quantité est de l'ordre de 4,7 kg par hectare et par an. L'hydrolyse complète des tiges donnerait environ 170 kg/hectare/an d'acide paracoumarique.

La présence de ces constituants favorise la croissance des Actinomycétales qui comptent parmi les souches les plus résistantes à l'acide paracoumarique, et inhibe les *Bacillus*, peu résistants. Certaines de ces Actinomycétales produisent *in vitro* des substances antibiotiques inhibant la croissance de la microflore présente( *Bacillus* et *Arthrobacter*). Ce mécanisme pourrait intervenir dans le sol, et expliquer le fait que le nombre de microorganismes présents dans le sol essai soit du même ordre de grandeur que celui du sol témoin.

— Il y a une sélection, dans la rhizosphère du maïs, des bâtonnets Gram-négatifs résistants à l'acide paracoumarique.

On conçoit que cette microflore spécialisée puisse dégrader l'acide paracoumarique au fur et à mesure de sa libération dans le sol, expliquant la faible teneur retrouvée, même après des apports élevés en tiges de maïs. En effet, alors que les apports cumulés peuvent être estimés à 1 200 kg d'acide paracoumarique par ha, dans le sol-essai, après sept ans, la quantité retrouvée est voisine de 14 kg.

Or, HENNEQUIN et JUSTE (1967) ont mis en évidence que de faibles doses d'acide paracoumarique (10 à 50 p.p.m.), sont susceptibles d'inhiber la croissance du maïs. Il est très possible que cette dégradation microbienne ne se déroule pas toujours d'une manière harmonieuse, et qu'une racine de maïs, se trouvant au contact d'un fragment de tiges de maïs enfoui récemment, soit en présence d'une concentration localement très forte en acide paracoumarique. De plus, le rapport carbone/azote des tiges de maïs au moment de leur enfouissement est de l'ordre de 75 à 110 et l'azote disponible dans le sol peut ne pas suffire à leur décomposition.

Par ailleurs, l'enfouissement des tiges de maïs favorise les Actinomycétales dont la croissance est généralement moins rapide que celle des autres groupes bactériens. Ce fait traduit effectivement une diminution de l'activité biologique du sol.

La teneur du sol en acide paracoumarique pourrait alors atteindre le seuil de la phytotoxicité et contribuer à expliquer les baisses de rendement observées en monoculture de maïs.

Cette hypothèse s'ajoute à celles déjà avancées pour expliquer la fatigue des sols de maïs qui envisagent :

— une dégradation de la structure par tassement du sol,
— un blocage ou des pertes d'azote consécutifs à l'enfouissement des tiges de maïs,
— des carences en oligo-éléments.

En fonction de ces hypothèses, il pourrait être tenté dans une expérimentation complémentaire d'accélérer la décomposition des tiges de maïs (apport d'azote, éventuellement façons culturales), en favorisant une plus grande activité biologique du sol, ce qui pourrait permettre une dégradation plus rapide de l'acide paracoumarique.

*Reçu pour publication en août 1970.*

## SUMMARY

### THE EFFECT OF REPEATED PLOUGHING IN OF MAIZE STALKS ON THE BACTERIAL MICROFLORA OF SOILS

The study of a soil given over to the monoculture of maize revealed the existence of a microflora particularly rich in *Actinomycetales* and adapted to the use of the paracoumaric and oxalic acids which are contained in considerable quantities in the stalks of maize.

These facts were ascertained by means of soil from an experimental field into which large quantities of maize stalks had been ploughed over a period of seven years. The microflora of this field and of a control plot, as well as the rhizosphere of the maize plant, were investigated with the following results :

1. Enrichment of the soil with maize stalks gives rise to a special kind of microflora. The presence of paracoumaric and oxalic acids encourages the proliferation of *Actinomycetales* which produce *in vitro* antibiotics inhibiting the growth of the *Arthrobacter* and *Bacillus* species that form the main part of the control plot's microflora. Moreover, these strains are more sensitive to paracoumaric acid than are the *Actinomycetales*.

2. The predominant bacteria in the maize rhizosphere are of the Gram negative rod type belonging to the following genera : *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Acinetobacter*, and are resistant to paracoumaric acid, the source of carbon and energy for 16 p. 100 of the strains.

3. The paracoumaric and oxalic acids are in every case broken down by special microflora.

The possible parts played respectively by soil microflora and paracoumaric acid in regard to soil fatigue in ground used for the monoculture of maize are discussed.



## ZUSAMMENFASSUNG

### EINFLUSS DES WIEDERHOLTEN UNTERPFLÜGENS VON MAISSTENGELN AUF DIE BAKTERIELLE MIKROFLORA DER BÖDEN

Die Untersuchung eines mit Mais in Einfelderwirschaft angebauten Bodens hat das Vorhandensein einer besonderen Mikroflora gezeigt, die sehr reich an Strahlenpilzen ist, unter Anpassung an die Verwendung der in bedeutenden Mengen in den Maisstengeln vorhandenen Paracumarsäure und Oxalsäure.

Diese Tatsachen wurden an Hand von Böden bestätigt, die aus einem Versuchsfeld stammten, wo massive Eingrabungen von Maisstengeln während sieben Jahren durchgeführt worden waren. Die Untersuchung der Mikroflora eines Testbodens aus dem mit Maisstengeln und Rhizosphären derselben Pflanze angereicherten Acker zeigte folgende Ergebnisse :

1° Die Anreicherung des Bodens mit Maisstengeln ruft eine besondere Mikroflora hervor. Die Anwesenheit der Paracumarsäure und der Oxalsäure begünstigt die Wucherung von Strahlenpilzen, die *in vitro* Antibiotika hervorbringen. Diese letzteren verhindern das Wachstum der *Arthrobacter* und der *Bacillus*, die den Hauptbestandteil der Mikroflora des Testbodens bilden. Diese Stämme weisen ausserdem eine grössere Empfindlichkeit gegenüber der Paracumarsäure auf als die Strahlenpilze.

2° In der Rhizosphäre des Mais findet man hauptsächlich Gram negative Stäbchen von drei Gattungen : *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Acinetobacter*, die der Paracumarsäure, die für 16 p. 100 der Stämme als Kohlenstoff- und Energiequelle dient, widerstehen.

3° Die Paracumarsäure und die Oxalsäure werden in allen Fällen durch eine spezielle Mikroflora abgebaut.

Die eventuellen gegenseitigen Einflüsse der Bodenmikroflora und der Paracumarsäure bezüglich der Ermüdungsphänomene des Bodens bei Maiseinfelderkultur werden diskutiert.

## РЕЗЮМЕ

*Влияние повторных запашек кукурузных стеблей на бактериальную микрофлору почв*

Ж. РИВИЕР, И. ФРУАР, Г. КАТРУ, при техническом сотрудничестве Б. БЕРТЬЕ.

Изучение почвы под монокультурой кукурузы показало существование совершенно особой микрофлоры, с крупными количетсвами Актиномицетов, приспособленной к использованию паракумаровой и щавелевой кислот, содержащихся в большом количестве в кукурузных стеблях.

Это было доказано на почвах экспериментального поля, на котором массовые количества кукурузных стеблей запахивались в течении семи лет. Изучение микрофлор контрольного и обогащенного запаханными стеблями кукурузы полей, а также ризосферы этого растения, дало следующие результаты :

1. Обогащение почвы запаханными кукурузными стеблями вызывает появление особой микрофлоры. Присутсвие паракумаровой и щавелевой кислот способствует размножению Актиномицетов — продуцентов *in vitro* антибиотиков подавляющих рост видов *Arthrobacter* и *Bacillus*, — главных представителей микрофлоры контрольного поля. Эти штаммы, кроме того, более чувствительны к паракумаровой кислоте, чем Актиномицеты.

2. В ризосфере кукурузы отмеченно особенно присутствие грам-негативных палочек принадлежащих к трем видам : *Pseudomonas, Flavobacterium, Acinetobacter,* стойких к паракумаровой кислоте , служащей для 16-ти % этих штаммов источником углерода и энергии.

3. Паракумаровая и щавелевая кислоты деградируются специализованной микрофлорой во всех случаях.

Обсуждается затем вероятная обоюдная роль микрофлоры почвы и паракумаровой кислоты в проявлении феноменов почвенной усталости.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


Ball R. S., Sellers W., 1966. Improved motility medium. *Appl. Microbiol.*, **14**, 670.

Beaud G., Manigault P., 1966. Propriétés physiologiques des différentes souches d'*Agrobacterium tumefaciens*. *Ann. Inst. Pasteur*, **111**, 345.

Catroux G., Fournier J.-C., Rivière J., 1969. Mise en évidence rapide de l'utilisation des acides phénols par des souches bactériennes isolées du sol. *Ann. Inst. Pasteur*, **116**, 99-102.

Delas J., 1963. Évolution de l'azote minéral en sol nu, sous climat atlantique en fonction de diverses fumures organiques. *C. R. Acad. Agric.*, **49**, 383-392.

De Ley J., Bernaerts M., Rassel A., Guilmot J., 1966. Taxonomy of the *Agrobacterium*. *J. Gen. Microbiol.*, **43**, 7-17.

Dommergues Y., Beck G., 1966. Mise en évidence des microorganismes dégradant les complexes organo-métalliques dans le sol. *Biologie du sol*, **6**, 32-34.

Guenzi W. D., McCalla T. M., 1966 *a*. Phytotoxic substance extracted from soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **30**, 214 216.

Guenzi W. D., et McCalla T. M., 1966 *b*. Phenolic acids in oats, wheat, sorghum, and corn residues and their phytotoxicity. *Agronomy J.*, **58**, 303-304.

HATSUDA Y., NISHIMURA S., HAMASAKI T., RENBUTSU M., 1965. Inhibitory effects of some phytotoxic substances produced by plant roots upon the growth of higher plant-seedlings and microorganisms. *J. Fac. Agr., Tottori Univ.*, **4**, 183-188.

HENDRIE M. S., HODGKISS W., SHEHAW J. M., 1964. Considerations on organisms of the *Achromobacter-alcaligenes* group. *Ann. Inst. Pasteur* (Lille), **15**, 43.

HENNEQUIN J. R., JUSTE C., 1967. Présence d'acides phénols libres dans le sol. Étude de leur influence sur la germination et la croissance des végétaux. *Ann. agron.*, **18**, 545-569.

IRCHA, 1970. *Clef d'identification des bactéries des eaux* (sous presse).

JUSTE C., 1970. Communication personnelle.

KIM J., NAYLOR H. B., 1966. Spore production by *Bacillus stearotehrmophilus*. *Appl. Microbiol.*, **14**, 690.

MULLAKHANBHAL M. F., BHAT J. V., 1966. The degradation of aromatic compounds by *Arthrobacter species*. *Current Science*, **3**, 58-59.

PORTER J. N., WILHEM J. J., SIMPSON B. B., 1962. Useful criteria for studying the distributory o *Streptomyces* in soils. In : *Developments in Industrial Microbiology*, **3**, 240-244. *Soc. Ind. Microbiol.* Washington.

PORTER J. N., WILHEM J. J., TRESNER H. D., 1960. Method for the preferential isolation of Actinomycetes. *Appl. Microbiol.*, **8**, 174.

RIVIÈRE J., 1963. Rhizosphère et croissance du Blé. *Ann. agron.*, **14**, 619-653.

ROUX L., LESAINT C., 1959. Mise au point d'une technique de détermination des acides organiques chez les végétaux. *Ann. Physiol. végét.*, **1**, 83-91.

ROVIRA A. D., BARBARA M., MCDOUGALL M., 1967. Microbiological and biochemical aspects of the rhizosphère. In : MCLAREN A. D., PETERSON G. F., ed. *Soil Biochemistry*, Marcel Dekker, New York.

SINGH-VERMA S. B., 1967. On the problem of quantitative estimation of microorganisms in soil. *Biologie du sol*, **7**, 14.

SNEATH P. H. A., 1956. Cultural and biochemical characters of the germs *Chromobacterium*. *J. Gen. Microbiol.*, **15**, 70.

STANIER R. Y., PALLERONI N. J., DOUDOROFF M., 1966. The aerobic Pseudomonas : a taxonomic study. *J. Gen. Microbiol.*, **43**, 159-271.

STEVENSON I. L., 1967. Utilization of aromatic hydrocarbons by *Arthrobacter* sp. *Can. J. Microbiol.*, **13**, 205-211.

TARDIEUX P., LAJUDIE J., CHALVIGNAC M.-A., 1960. Effet rhizosphérique du maïs en culture hydroponique aux premiers stades de croissance. *7 th Intern. Cong. Soil Sci.*, Madison, U. S. A. Transact. II, 562-567.

THORNLEY M. A., 1967. A taxonomic study of *Acinetobacter*. *J. Gen. Microbiol.*, **49**, 211-257.

VERON M., GASSER F., 1963. Production de $H_2S$ par les Entérobactéries. *Ann. Inst. Pasteur*, **105**, 524

WAKSMAN S. A., 1959. *The Actinomycetes*. Williams and Williams Ed. Baltimore.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (4), 421-452.

# INFLUENCE DES COMPOSÉS ORGANIQUES SOLUBLES SUR LA PÉDOGENÈSE EN MILIEU ACIDE (1)

## I. — Études de terrain

S. BRUCKERT

*Centre de Pédologie,*
*Faculté des Sciences, 54 - Nancy*
*Centre national de la Recherche scientifique*

RÉSUMÉ

Ces recherches concernent la formation, la migration et l'insolubilisation des complexes organo-métalliques (Fe-Al) à base de composés solubles issus des litières évoluant en milieu biologiquement très actif (sols à mull) ou faiblement actif (sols à mor) ; ces agents complexants comprennent essentiellement des acides organiques simples et des composés polymérisés, mais le pouvoir complexant des premiers représente pour un poids donné de litières trois fois le pouvoir complexant des seconds.

Les résultats obtenus *in situ* ont permis de déterminer de façon précise les principaux acides organiques simples migrant dans les sols : acides citrique et oxalique (aliphatiques), vanillique et *p*. hydroxybenzoïque (aromatiques). L'étude de leur évolution au cours d'un cycle de végétation a montré que la production annuelle d'acides organiques susceptibles de complexer et d'entraîner le Fe ou l'Al, est bien plus forte dans les sols à mor que dans les sols à mull.

## INTRODUCTION

La plupart des spécialistes sont maintenant d'accord pour distinguer, dans les phénomènes d'évolution des sols tempérés (en particulier en ce qui concerne les « migrations » de substances), deux processus bien distincts, le « lessivage » et la « podzolisation » ; il y a une vingtaine d'années, ces deux processus étaient cependant confondus et désignés souvent par le même adjectif « podzolique », les différences constatées entre les sols étant considérées comme des différences de degré, non de nature du processus.

(1) Extrait d'une thèse de doctorat d'État soutenue à la Faculté des Sciences de l'Université de Nancy le 8 juin 1970.

Dès 1948, DUCHAUFOUR, puis DUVAL (1953) ont introduit cette distinction et montré que la podzolisation ne se réduisait pas à une simple migration, mais aussi à une « altération » plus ou moins intense produite par des substances organiques agressives.

Cette notion s'est rapidement répandue dans toute l'Europe occidentale et a été adoptée par de nombreux auteurs : KUNDLER, 1957 ; KOHL, 1958 ; EHWALD *et al.*, 1964. Peu à peu, le rôle « complexant » de la matière organique soluble à l'égard du fer et de l'aluminium a été mis en évidence par de nombreuses recherches et expériences. HÉNIN et BÉTRÉMIEUX (1950) étudient les phénomènes d'oxydo-réduction du fer au cours des fermentations de diverses matières organiques et prouvent la formation de complexes organo-ferriques solubles même en présence de 10 p. 100 de $CO_3Ca$. SIUTA (1962) a montré que cette action complexante, non seulement favorisait les migrations, mais encore accélérait l'altération des minéraux. BLUME (1964) a pu alors opposer de façon plus précise, le « lessivage », processus d'entraînement mécanique des argiles et du fer sans intervention de la matière organique, à la « podzolisation », processus d'altération chimique des argiles et de formation de complexes solubles par la matière organique.

Très vite, il est apparu que la podzolisation était liée à la « conservation » dans le profil, de produits organiques solubles très acides, donc à la présence de type d'humus biologiquement peu actif et à décomposition lente (mor), alors que le « lessivage » était l'apanage de sols à mull biologiquement actifs : ceci du moins en climat atlantique. Mais certaines notes discordantes ont été aussi émises sur ce sujet : BLOOMFIELD (1963) a affirmé que les podzols se forment aussi bien sous forêt feuillue que résineuse, et qu'il n'était pas indispensable que l'humus soit un « mor ». La plupart des auteurs russes, tout en admettant la distinction entre les deux types de pédogenèse (FRIDLAND, 1958 ; RODE, 1964 ; RODE et RASHEVSKAYA, 1966), émettent des réserves sur leur liaison avec le type d'humus, en raison du caractère « podzolique » de certains sols à « mull » (sols derno-podzoliques et sols gris forestiers) dans lesquels les deux processus semblent se superposer plus ou moins (LEBEDEVA, 1967 ; RODIONOV et VYSOTSKAYA, 1967) : il y a là semble-t-il, un phénomène particulier, lié au climat boréal et continental. Nous essayerons de répondre à cette question dans la conclusion de ce mémoire.

Il s'agissait alors d'identifier les composés organiques solubles, responsables de la podzolisation et de rechercher leur origine (litière ou « humus » déjà évolué) et enfin, de préciser leur mode d'action. De multiples expériences de laboratoire ont été effectuées dans ce but, généralement à l'aide de dispositifs de percolation : certains auteurs ont porté leur attention sur le rôle des « extraits de litière » dans les processus de complexation (BLOOMFIELD, 1952 ; LOSSAINT, 1959) ; les autres au contraire, ont surtout étudié les « composés humiques », en particulier les « acides fulviques » tels que ceux extraits des horizons B des podzols (SCHNITZER et SKINNER, 1963 ; SCHNITZER, 1967 ; SCHNITZER et DESJARDINS, 1969).

Or, il faut bien reconnaître que les résultats obtenus sont contradictoires, et qu'ils n'ont pas permis de répondre avec précision aux questions posées. Ainsi BLOOMFIELD et LOSSAINT pensent que les extraits de litière jouent le rôle principal, mais paradoxalement, ils trouvent une action complexante plus importante pour les espèces génératrices d'un mull (Frêne, Charme) que pour les espèces qui engendrent un mor (Pin) ; il semble que ceci tienne à ce que ces auteurs, opérant en milieu

stérile, ont souvent négligé l'influence des processus de biodégradation et d'insolubilisation biologique des substances complexantes : LOSSAINT a d'ailleurs quelque peu rectifié son interprétation dans ses recherches ultérieures.

En ce qui concerne les « composés humiques ou fulviques », alors que BLOOMFIELD les considère comme inefficaces (1963), SCHNITZER au contraire admet qu'ils constituent les principaux composés responsables des phénomènes de complexation dans les sols.

Il convenait donc de reprendre ces expériences, en effectuant une comparaison plus précise avec les phénomènes naturels étudiés *sur le terrain même* et d'autre part, en tenant compte des processus de biodégradation ou d'insolubilisation biologique des agents complexants qui jouent très probablement un rôle essentiel.

Nous espérons pouvoir ainsi répondre aux trois questions suivantes : 1) Quels sont les agents complexants les plus actifs dans les sols et quelle est leur origine ? 2) Quel est leur mode d'action dans les sols à activité biologique différente (sols à mull et sols à mor) ? 3) Comment évoluent-ils dans les deux types de sol ; quel est en particulier le *processus* de biodégradation ou d'insolubilisation chimique des complexes dans les deux types de profil ?

## CHAPITRE I

# IDENTIFICATION DES AGENTS COMPLEXANTS ET SOLUBILISANTS VIS-A-VIS DES CATIONS

### I. — ORIGINE DES AGENTS COMPLEXANTS : RÔLE FONDAMENTAL DES COMPOSÉS ORGANIQUES SOLUBLES ISSUS DES LITIÈRES

#### 1. *Action globale des extraits aqueux de litières*

Les premières expériences effectuées en vue de mettre en évidence le rôle fondamental des composés solubles originaires des litières, démontrèrent d'abord l'action globale des extraits sur des précipités colloïdaux d'hydroxyde de fer (BLOOMFIELD, 1952), sur des ions ferriques fixés sur résines échangeuses de cations (SCHNITZER et DELONG, 1952) et sur des oxydes de fer naturels présents dans les sols (LOSSAINT, 1954) ; elles mirent alors en évidence l'effet solubilisant de tous les extraits étudiés. Puis les travaux de LOSSAINT (1959) établirent bientôt une corrélation hautement significative entre le taux des matières hydrosolubles et la quantité de fer solubilisée.

#### 2. *Composition des extraits de litières*

Les composés responsables de la complexation et de la solubilisation des cations à des pH où ces éléments minéraux sont normalement insolubles, peuvent appartenir à des espèces chimiquement très diverses (MORTENSEN, 1963) et un certain nombre de ces produits existent en fait dans les extraits aqueux des litières non décomposées.

Leur étude ou leur identification, effectuée récemment grâce aux méthodes chromatographiques, conduit à distinguer essentiellement les composés suivants : les premiers constituent des produits simples, de formule chimique généralement connue : acides aliphatiques, acides phénols, acides aminés, sucres et polyphénols (COULSON *et al.*, 1960 *a* et *b* ; NYKVIST, 1963 ; MUIR *et al.*, 1964 *a* ; JACQUIN et BRUCKERT, 1965 ; JUNG *et al.*, 1968). Les seconds comprennent divers composés de poids moléculaire plus ou moins élevé et de formule chimique le plus souvent incomplètement caractérisée : esters, hétérosides, polymères complexes libérant des acides phénols simples par hydrolyse alcaline (BRUCKERT *et al.*, 1967) ou acide (BLOOMFIELD et KING, 1968).

### 3. *Action des composés présents dans les extraits de litières*

1° *Sucres et acides aminés.*

On peut réunir en un seul groupe ces deux espèces chimiques extraites des feuilles, car d'après KAURICHEV et NOZDRUNOVA (1961), MORTENSEN (1963), MUIR *et al.* (1964 *b*), elles n'ont aucun pouvoir complexant vis-à-vis du fer et de l'aluminium.

2° *Acides aliphatiques.*

A l'inverse des composés précédents, les acides aliphatiques complexent et solubilisent, à des degrés divers, de nombreux cations. Cette propriété capitale est connue depuis fort longtemps des pédologues (HARRAR, 1929 ; JONES et WILLCOX, 1929 ; SMYTHE et SCHMIDT, 1930) ; elle sert d'ailleurs de base aux principales méthodes d'extraction du fer et de l'aluminium libres des sols, qui utilisent les citrates et les oxalates (TAMM, 1922 ; DEB, 1950 ; DEMOLON, 1952 ; DUCHAUFOUR et SOUCHIER, 1966).

L'action extrêmement efficace de ces deux composés vis-à-vis des ions $Fe^{++}$, $Fe^{+++}$, $Fe\,(OH)^{++}$, $Fe\,(OH)_2^+$ ou $Al^{+++}$, $Al\,(OH)^{++}$, $Al\,(OH)_2^+$, est également corroborée par les valeurs élevées des constantes reproduites au tableau I, qui témoignent de la grande stabilité des complexes formés.

TABLEAU I

*Contantes de stabilité de divers citrates et oxalates de fer et d'aluminium*
(d'après RINGBOM, 1967)

| Citrate | log K | Oxalate | log K |
|---|---|---|---|
| $Fe^{+++}$ ..... | 25 | $Fe^{+++}$ | 18,5 |
| $Al^{+++}$ ..... | 20 | $Al^{+++}$ | 14,6 |
| $Al(OH)^{++}$ ..... | 30,6 | | |

Les combinaisons fer/citrate, qui font intervenir des carboxyles COOH et des hydroxyles OH, ont donné lieu assez récemment à des expériences importantes au point de vue pédologique. Il s'agit des travaux de MUIR *et al.* (1964 *b*) qui démontrent que le complexe fer/citrate reste soluble et stable quel que soit le pH, jusqu'à un rapport moléculaire de 2/1 ; dans ce cas, le complexe prendrait une forme anionique, le

fer se trouvant complètement masqué à l'état ferreux. L'acide citrique peut également complexer le fer à l'état ferrique dans des rapports moléculaires métal/anion pouvant atteindre 6/1, mais les combinaisons obtenues présentent une stabilité d'autant plus faible que le pH ambiant se rapproche de 4 environ ; de plus, ces complexes très riches en fer, précipitent sous l'influence des ions calcium (LOSSAINT, 1959 ; MUIR *et al.*, 1964 *b*).

Enfin, les acides citrique et oxalique ne constituant pas les seuls acides aliphatiques présents dans les extraits aqueux des litières, les chercheurs ont comparé leur action à celle des divers autres acides. BREMNER *et al.* (1946) étudient leur pouvoir d'extraction vis-à-vis du fer et du manganèse (tabl. 2) ; KAURICHEV et NOZDRUNOVA (1961) d'une part, MUIR *et al.* (1964 *b*) d'autre part, dosent les acides aliphatiques d'extraits aqueux de litières et comparent l'aptitude de ces composés à maintenir le fer en solution.

TABLEAU 2

*Quantité de fer et de manganèse extraite d'un sol par divers acides aliphatiques et exprimée en p.p.m. du sol* (d'après BREMNER *et al.*, 1946)

| Solution d'extraction | Fer (p.p.m.) | Manganèse (p.p.m.) |
|---|---|---|
| M/5 sodium citrate ..... | 397 | 520 |
| M/5 — malate ..... | 93 | 36 |
| M/5 — succinate ..... | traces | traces |
| M/5 — oxalate ..... | 62 | traces |

D'après tous ces travaux, on peut diviser les acides aliphatiques en trois groupes suivant l'intensité de leur action complexante vis-à-vis du fer et de l'aluminium :

les acides citrique et oxalique constituent de l'avis unanime, les agents complexants les plus puissants ;

l'acide malique ne présente qu'un pouvoir complexant très moyen ;

quant aux acides succinique, lactique, quinique et shikimique, ils n'ont qu'un pouvoir de complexation faible ou nul.

3° *Acides phénols et composés polyphénoliques.*

Jusqu'à ces dernières années, on désignait par « polyphénols », un ensemble mal délimité de composés simples comportant plusieurs fonctions phénoliques OH et de composés aromatiques complexes de poids moléculaire plus ou moins élevé (BLOOMFIELD, 1957 ; LOSSAINT, 1957). S'il paraît encore logique de classer les produits simples parmi les polyphénols ou acides phénols *sensu stricto*, il semble par contre plus normal de ranger les substances condensées, généralement de teinte brune, parmi les polymères solubles mentionnés plus loin.

Certains composés phénoliques simples, comme les catéchines identifiées par COULSON *et al.* (1960 *a* et *b*), peuvent réduire et complexer le fer, mais leur action semble de courte durée ; en effet, les catéchines, comme la plupart des acides phénols et des polyphénols présents dans les extraits aqueux de litières fraîches, disparaissent rapidement des feuilles en décomposition (DUCHAUFOUR *et al.*, 1968) par autoxyda-

tion et oxydation enzymatique au cours de leur polymérisation (BLOOMFIELD, 1963 ; JACQUIN et MANGENOT, 1964 ; MANGENOT *et al.*, 1965 ; ANDREUX, 1969).

4° *Polymères solubles, précurseurs des acides fulviques.*

Dès 1957, BLOOMFIELD attribue aux composés bruns solubles originaires des litières, un rôle essentiel dans le processus de réduction et d'entraînement du fer observé dans les podzols. L'auteur les désigne alors par le terme général de polyphénols mais démontre plus tard qu'il s'agit en fait d'édifices moléculaires complexes, capables de libérer par hydrolyse acide plusieurs composés phénoliques simples (BLOOMFIELD et KING, 1968).

On pense maintenant que ces composés polymérisés constituent les éléments précurseurs des *acides fulviques*, présents à l'état soluble dans les litières en décomposition (SCHNITZER et DESJARDINS, 1969), puis des *acides fulviques sensu stricto* insolubilisés dans les horizons minéraux (et même de certains « acides humiques » peu polymérisés) ; à ce stade, ils seraient formés de 4 ou 5 noyaux aromatiques portant des fonctions carboxyliques et phénoliques ; de plus, la proximité immédiate de ces deux groupements conférerait à ces molécules leur pouvoir complexant (SCHNITZER, 1969).

### 4. *Conclusion*

Dans l'état actuel de nos connaissances, on peut affirmer que, parmi les matières solubles originaires des litières fraîches ou en décomposition ($A_0$), il existe essentiellement deux groupes de composés capables de former avec les cations et notamment avec les sesquioxydes, des complexes organo-métalliques. Il s'agit d'une part d'acides organiques simples, produits contenant généralement des fonctions OH alcooliques ou phénoliques à côté des fonctions COOH carboxyliques et d'autre part, de composés polymérisés de poids moléculaire élevé, précurseurs des acides fulviques. Mais aucune expérience tentée jusqu'à ce jour n'a permis de comparer le pouvoir complexant respectif de ces deux groupes de composés séparés d'un même extrait de feuilles.

## II. — COMPLEXATION DU FER (III) PAR LES ACIDES ORGANIQUES SIMPLES ET LES COMPOSÉS POLYMÉRISÉS D'UN EXTRAIT NATUREL DE MOR

Dans le but de préciser l'action complexante vis-à-vis de l'ion ferrique, d'une part des acides organiques simples, d'autre part des composés polymérisés d'un même extrait de litière, il nous a paru important d'obtenir en premier lieu un extrait aqueux de mor, tel qu'il percole *in situ*. Ensuite, on a procédé à la séparation des deux fractions organiques définies ci-dessus et à leur caractérisation chimique.

Enfin, deux séries d'expériences ont permis d'une part de comparer l'aptitude de chaque fraction à former avec le fer des complexes solubles d'autre part, de déterminer leur pouvoir d'extraction vis-à-vis du fer d'un horizon de sol.

Toutes ces analyses, répétées au moins deux fois, ont été pratiquées également avec un extrait aqueux de feuilles de Hêtre fraîchement tombées ; les résultats obtenus dans ce cas corroborent exactement les renseignements concernant le mor.

### 1. *Matériel et méthodes*

1° *Extraction de la solution de mor.*

Afin d'obtenir environ 3 litres d'extrait aqueux, nous avons centrifugé à 3 500 t/mn une quantité suffisante de l'horizon $A_0$ d'un podzol humo-ferrugineux prélevé à Taintrux (Vosges)

(BRUCKERT et JACQUIN, 1969 *a*) ; après centrifugation à 18 000 t/mn, l'extrait obtenu, de couleur jaune brun et de réaction acide (pH 4, 1) contenait 577 mg/l de matières hydrosolubles dont 202 mg/l de carbone.

2° *Séparation et caractérisation des acides de faible poids moléculaire et des polymères.*

Dans le but d'utiliser une technique ne modifiant pas la nature des produits solubles, nous avons procédé à plusieurs essais de séparation soit par chromatographie sur colonne (Séphadex, silice), soit en employant les propriétés des résines échangeuses d'ions. Les résultats, contrôlés par la caractérisation physico-chimique des substances séparées, ont montré que la fixation sélective des anions sur Dowex 1 × 8 correspondait à la technique la plus satisfaisante. *Les acides organiques présents dans la fraction anionique* sont séparés par chromatographie sur colonne et dosés selon les techniques décrites par BRUCKERT (1970) ; *les matières hydrosolubles initiales et les polymères* sont caractérisés à l'aide des spectres I. R.

3° *Étude du pouvoir complexant d'une solution organique vis-à-vis du fer* (III).

En vue de mettre en évidence la formation de complexes hydrosolubles entre le fer et un agent chélatant, nous avons choisi une méthode spectrophotométrique, dite des variations continues (JOB, 1928 ; VOSBURGH et COOPER, 1941 ; SCHNITZER et SKINNER, 1963 ; COURPRON, 1967 ; RINGBOM, 1967). Son principe fait intervenir les différences d'absorption Y existant entre un complexe et ses deux composants pris séparément. Chaque solution organique A correspondant à l'extrait initial dilué au cinquième et une solution ferrique B (0,2 M $10^{-3}$ dans $NO_3H$ 0, 1 M) sont mélangées dans une série de rapports R tels que le nombre total de ml soit constant ; la densité optique des mélanges et des composants A et B est mesurée à 260-280-325-345-365 mμ ; à chaque longueur d'onde les différences d'absorption Y sont portées sur un graphique en fonction de R; la valeur maximum de Y correspond à la plus grande concentration de complexe formé et R détermine le nombre de ml de solution complexante A qui se combine à 1 ml de solution ferrique B.

4° *Extraction du fer par les solutions organiques étudiées.*

Un horizon d'accumulation naturellement riche en sesquioxydes ($B_{fe}$ de podzol) est agité deux heures en présence d'eau ou des solutions d'anions et de polymères ; après centrifugation, on mesure la densité optique des extraits et on dose par absorption atomique, le fer mis en solution.

## 2. *Résultats et discussion*

### 1° *Caractérisation des solutions organiques.*

La solution d'anions contient plusieurs acides organiques dont les concentrations figurent au tableau 3. Parmi ces anions, nous soulignerons l'importance des acides citrique, oxalique et malique, en raison de leur pouvoir complexant élevé.

TABLEAU 3

*Quantité des divers acides organiques présents dans l'extrait de mor*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Acide citrique ..... | 2 675 μg/l | Acide malonique ..... | 1 025 μg/l |
| Acide malique ..... | 4 850 — | Acide acétique..... | 1 425 — |
| Acide oxalique ... ..... | 7 750 — | Acides succinique et lactique ..... | 5 925 — |

Solution de polymères : les matières hydrosolubles de l'extrait de mor permettent l'établissement du spectre IR représenté à la figure 1 (*a*) ; les polymères issus de la solution de mor débarrassée des cations et des anions fournissent le spectre IR figuré en 1 (*b*). Par comparaison avec le tracé 1 (*a*), on observe une augmentation des fonctions phénoliques OH et carboxyliques COOH. On vérifie ainsi que le traitement de

l'extrait de mor par des échangeurs d'ions a pour résultat la libération de fonctions salifiées et on est en droit de penser que la structure des polymères est tout à fait comparable à celle des matières solubles initiales.

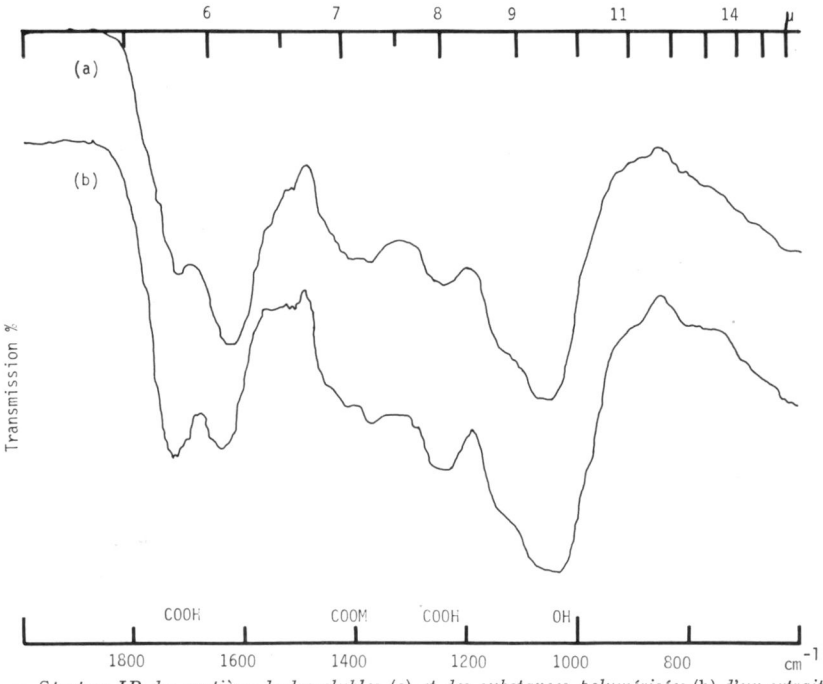



FIG. 1. — *Spectres IR des matières hydrosolubles* (a) *et des substances polymérisées* (b) *d'un extrait de mor*

2° *Étude de la formation des complexes organo-ferriques.*

Les valeurs maximum de Y observées pour les complexes correspondant aux diverses solutions organiques permettent de calculer les résultats rassemblés au tableau 4. On constate que si le pouvoir complexant d'un extrait de mor provient des anions de faible poids moléculaire et des polymères, les premiers cités présentent une action beaucoup plus importante (plus des deux tiers).

TABLEAU 4

*Complexation du fer III par les diverses solutions organiques étudiées*

| Fer complexé exprimé en | Fer complexé par la solution de | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 = anions | 2 = polymères | 3 = 1 + 2 | Mor non traitée |
| mg/l ..... | 9,28 | 3,94 | 13,22 | 13,56 |
| % de 3 ..... | 70,2 | 29,8 | | |

3° *Libération des sesquioxydes à partir d'un horizon de sol.*

Le pouvoir d'extraction des anions et des polymères vis-à-vis du fer présent dans un horizon $B_{fe}$ de podzol est comparé à celui de l'eau (tabl. 5).

TABLEAU 5

*Extraction du fer d'un horizon $B_{fe}$ de podzol par diverses solutions et variation de densité optique des extraits*

| Solutions d'extraction | Fer extrait exprimé en | | | Densité optique à 325 mμ | |
|---|---|---|---|---|---|
| | mg/l | mg/l Témoin déduit | % de 3 | avant extraction | de l'extrait obtenu |
| Eau = témoin .... | 0,53 | | | 0,0 | 0,162 |
| 1 = anions ..... | 2,34 | 1,81 | 75 | 0,135 | 0,630 |
| 2 = polymères ... | 1,13 | 0,60 | 25 | 1,150 | 0,360 |
| 3 = 1 + 2 ..... | | 2,41 | | | |

Cette expérience vérifie les résultats précédents (tabl. 4) ; en effet, le fer mis en solution par les anions atteint 75 p. 100 du fer mobilisé au total ; donc, l'action complexante de ces composés est trois fois plus élevée que celle des polymères. D'autre part, nous observons des variations considérables de la densité optique des solutions, *variations liées à la concentration de matière organique.*

La densité optique de la solution de polymères a diminué, ce qui implique une fixation de ces composés par le sol ; on assiste donc simultanément à une faible libération de fer, probablement due aux produits les moins polymérisés, et à une insolubilisation de composés organiques de poids moléculaire élevé ; ce dernier processus qui pourrait être attribué à l'action des sesquioxydes présents en quantité abondante dans l'horizon $B_{fe}$, rappelle de façon évidente l'insolubilisation énergique des composés aromatiques étudiés par BLOOMFIELD et KING (1968), par formation de complexes floculés (LOSSAINT, 1957) ou par adsorption sur les oxydes ferriques (KYUMA et KAWAGUCHI, 1964 ; ADACHI, 1964 ; KING et BLOOMFIELD, 1966 et 1968).

A l'opposé, la densité optique de la solution d'anions a fortement augmenté, traduisant ainsi un enrichissement de la phase liquide en substances absorbantes ; cet effet de solubilisation dû aux acides organiques a déjà été observé par GALLAGHER et WALSH (1943) et par SCHNITZER et SKINNER (1964). Les anions semblent donc favoriser la mobilité de certains polymères en les déplaçant de leurs combinaisons peu solubles avec les métaux.

### 3. *Conclusion*

Avant de tirer les conclusions qui s'imposent, rappelons que les résultats ci-dessus concernant un extrait de mor, sont parfaitement reproductibles avec un extrait de feuilles de Hêtre. On peut donc penser que les solutions percolant à travers les litières forestières fraîches ou en décomposition et notamment celles qui traversent des mor épais, s'enrichissent en composés organiques capables de former des com-

plexes hydrosolubles avec les cations. Nos expériences montrent que si le pouvoir complexant d'un extrait de mor peut être attribué aux anions de faible poids moléculaire et aux substances polymérisées, les premiers présentent une action trois fois plus importante.

D'autre part, dans les sols, les anions simples joueraient non seulement un rôle considérable dans la mobilisation du fer, mais encore favoriseraient la migration des polymères, énergiquement insolubilisés par les sesquioxydes.

Pour ces raisons, il convient maintenant de déterminer *in situ* les acides organiques présents dans différents sols et de suivre leur évolution au cours d'un cycle de végétation.

## CHAPITRE II

## RECHERCHES DE TERRAIN : ÉVALUATION QUANTITATIVE DES AGENTS COMPLEXANTS ACTIFS DANS LES SOLS A MULL ET DANS LES SOLS A MOR

Le but général de ces déterminations consiste à comparer : 1) la composition en acides organiques de litières génératrices d'un mull ou d'un mor. 2) la répartition quantitative des acides organiques dans quelques sols forestiers, caractérisés par les deux types d'humus. 3) la production annuelle des agents complexants actifs dans un sol brun lessivé et dans un podzol humo-ferrugineux.

L'étude des acides organiques portera essentiellement sur les composés mis en solution par l'eau, car c'est naturellement sous forme de sels et de combinaisons complexes solubles ou pseudo-solubles qu'ils interviennent dans les processus de lessivage et de podzolisation ; pour cette raison fondamentale l'utilisation de l'eau en tant que solvant d'extraction est parfaitement justifiée.

### I. — Acides organiques solubles originaires de litières génératrices d'un mull ou d'un mor

Bien que le matériel végétal retournant au sol chaque année ne soit pas le seul élément conditionnant la formation d'un type d'humus déterminé, il est généralement admis de considérer comme « *améliorantes* » certaines litières qui favorisent la constitution d'un mull et comme « *acidifiantes* » (bien que le terme soit en fait impropre), celles qui engendrent un mor. Dans cette optique bien précise, on n'envisagera ici que la composition en acides organiques d'une matière première avant transformation physico-chimique (lessivage) ou biologique (décomposition) sous l'effet de facteurs externes.

## 1. *Matériel et méthodes d'étude*

1° *Choix des litières.*

Afin d'établir une comparaison entre des stations caractérisées soit par un humus de type mull, soit par un humus de type mor, on a choisi les litières mentionnées ci-dessous :

*Litières dites « améliorantes » :* Feuilles de Chêne (*Quercus sessiliflora*)
Feuilles de Hêtre * (*Fagus silvestris*)
Feuilles de Fétuque (*Festuca silvatica*)

*Litières dites « acidifiantes » :* Pseudophylles de Sapin (*Abies pectinata*)
Pseudophylles de Pin (*Pinus silvestris*)
Rameaux de Callune (*Calluna vulgaris*)

Les feuilles de Chêne d'une part, celles de Hêtre et de Fétuque d'autre part, constituent le matériel végétal quasi total de deux litières améliorantes, l'une correspondant à un sol brun lessivé à mull actif (Grande-Fraize, Meurthe-et-Moselle), l'autre à un sol brun à mull acide (Col du Haut-Jacques, Vosges).

Les débris de Pin et de Callune représentent l'essentiel de la litière acidifiante d'un podzol humo-ferrugineux à mor (Taintrux, Vosges). Quant aux pseudophylles de Sapin, on les range habituellement parmi les litières acidifiantes, mais notons que ce matériel se trouve également associé aux feuilles de Hêtre et de Fétuque dans les stations vosgiennes à mull acide.

De cette façon, on met en parallèle non seulement des litières forestières provenant de l'étage dominant, mais encore celles formant le tapis herbacé caractéristique de sols à mull et à mor. Pour des raisons pratiques, ces sols sont décrits et analysés au chapitre suivant.

2° *Méthodes d'études.*

En vue de comparer les feuilles à un stade sensiblement identique de leur cycle végétatif, on s'est attaché à récolter le matériel d'étude en une seule fois, au début de la retombée annuelle des litières (novembre) ; on a prélevé environ 1 kg de débris végétaux en plusieurs points choisis au hasard, sur une surface de 300 m² ; on a procédé à l'homogénéisation et à l'analyse de l'humidité de chaque échantillon, puis à l'extraction des composés solubles par percolation à l'eau froide pendant 6 heures, sur 25 à 100 g de matériel ; le volume d'eau recueilli est égal à 10 fois ce poids. L'isolement et le dosage chromatographique des acides sont effectués selon des méthodes décrites par BRUCKERT (1970).

## 2. *Résultats*

Tous les extraits contiennent, à quelques exceptions près, les mêmes acides, mais en quantité très variable suivant l'espèce végétale (tabl. 6). On note surtout l'influence de l'espèce végétale dans l'opposition qui existe entre litières feuillues et litières résineuses, *les premières étant en automne beaucoup plus riches en acides organiques que les secondes*. Cette opposition peut être étendue aux débris de la strate herbacée — feuilles de Fétuque et rameaux de Callune — mais dans ce cas, c'est la litière améliorante (Fétuque) qui devient le matériel le moins riche en acides.

Par comparaison entre les composés aliphatiques et les composés phénoliques, on constate une nette prédominance quantitative des premiers sur les seconds et cette observation s'applique notamment aux acides citrique, malique et quinique.

## 3. *Discussion et conclusion*

Ces résultats complètent les renseignements obtenus par BLOOMFIELD (1952) et LOSSAINT (1959) sur le pouvoir complexant vis-à-vis du fer d'extraits de litières fraîches : en effet, les extraits de litières « non podzolisantes » (Chêne, Hêtre) se révèlent

(*) En fait, ce type de litière fait transition avec la série suivante (TOUTAIN, 1970).

*in vitro* plus actifs pour complexer le fer que des extraits de litières « podzolisantes » (Pin, Sapin), ce qui s'explique parfaitement par le fait que les acides organiques simples possèdent, par comparaison avec les autres constituants des extraits aqueux, plus des 2/3 du pouvoir complexant de ces solutions (chapitre I). Mais ces mêmes résultats n'expliquent pas les observations faites en milieu naturel où les litières des « mull » sont moins podzolisantes que les litières des « mor ».

TABLEAU 6

*Composition des litières fraîches : Quantité des divers acides aliphatiques et phénols hydrosolubles, exprimée en p.p.m. du poids de litière sèche à 105°C*

| Nature de l'acide | Litières fraîches améliorantes | | | Litières fraîches acidifiantes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Chêne | Hêtre | Fétuque | Sapin | Pin | Callune |
| *Aliphatiques :* | | | | | | |
| Malique | 1 320 | 6 560 | 285 | 67 | 101 | 227 |
| Citrique | 975 | 1 310 | 642 | 363 | 404 | 1 136 |
| Oxalique | 630 | 289 | 140 | 107 | 154 | 236 |
| Succinique | 65 | 290 | 89 | traces | traces | 93 |
| Lactique | traces | traces | 63 | traces | 0 | traces |
| Glucuronique | 20 | 145 | 53 | traces | traces | 47 |
| Quinique | non dosé | 513 | 0 | 255 | 333 | 2 360 |
| *Phénols :* | | | | | | |
| Vanillique | 72 | 88 | 12 | 11 | 30 | 23 |
| p-hydroxybenzoïque | 45 | 31 | 3 | 4 | 25 | 19 |
| p-coumarique | 37 | 48 | 7 | 33 | 20 | 35 |
| Caféique | 10 | 260 | 1 | 7 | 25 | 128 |
| Gentisique | 18 | 23 | 0 | 4 | 8 | 47 |
| Gallique | 160 | 17 | traces | 3 | 23 | 76 |
| Chlorogénique | 120 | 85 | traces | 11 | 22 | 276 |
| Férulique | 9 | 20 | 12 | 13 | 20 | 26 |
| Protocatéchique | 15 | 21 | 0 | 3 | 15 | 14 |

En fait, pour résoudre le problème, il convient de suivre l'évolution saisonnière des agents complexants actifs dans les humus et les horizons minéraux sous-jacents, en tenant compte des facteurs biologiques et physico-chimiques du milieu.

## II. — RÉPARTITION QUANTITATIVE DES ACIDES ORGANIQUES DANS QUELQUES SOLS A MULL ET A MOR

Il s'agit maintenant de comparer la composition en acides organiques d'horizon de sols où ces agents complexants ont pu s'infiltrer après lessivage de litière en cours de décomposition.

### 1. *Choix des sols et méthodes d'étude*

1° *Description sommaire et caractérisation des sols.*

*Sol brun acide.*

*Situation* : Forêt communale de Mortagne (Col du Haut-Jacques), Vosges — Altitude 600 m — Roche-mère : grès « intermédiaire » — Végétation : Sapinière à Hêtre (Fétuque).

*Profil.*

L : Litière à décomposition assez rapide.
$A_1$ (0-10) : Mull brun foncé, à structure finement grumeleuse et texture sableuse, traversé de nombreuses racines de *Festuca silvatica*.
$A_2$ (10-50) : Brun violacé, structuré en petits grumeaux ; texture sableuse ; transition diffuse avec BC.
BC (50-65) : Brun violacé, roche-mère en décomposition ; transition diffuse avec le grès « intermédiaire » plus rose.

*Sol brun lessivé.*

*Situation :* Forêt de Haye (Grande-Fraize, M. & M.) — Altitude 340 m — roche-mère : marnes aaleniennes. Végétation : chênaie à espèces caractéristiques du mull eutrophe et mésotrophe.

*Profil.*

L : Litière à décomposition rapide.
$A_1$ (0-8) : Mull actif brun, finement grumeleux, très poreux ; texture limoneuse ; racines nombreuses.
$A_2$ (8-30) : Brun clair à structure grumeleuse plus fine ; porosité plus faible ; texture limono-argileuse.
B (30-50) : Ocre jaune ; structure polyédrique à enrobements brillants ; texture limono-argileuse.
$B_g$ (50-55) : Horizon limono-argileux, dont la structure polyédrique tend à disparaître (fondue) ; compacité plus élevée qu'en B, marques de marmorisation et concrétions de Mn-Fe abondantes.
C : Marnes aaléniennes plus ou moins décomposées et contenant des cailloux calcaires.

*Sol ocre podzolique.*

*Situation :* Forêt communale de Bruyère, Vosges — Altitude 500 m — exposition Sud-Ouest. Roche-mère : grès vosgien — Végétation : Pin sylvestre (40 p. 100), Chêne (50 p. 100), Hêtre, Callune.

*Profil.*

$A_0$ (0-4) : Moder passant au mor fibreux sous les vieux pins ; lacis de racines d'Éricacées.
$A_1$ (2-10) : Gris foncé, sableux, particulaire : quartz décoloré, individualisé par rapport à la matière organique, taches cendreuses.
$B_h$ (10-15) : Brun ocre à taches marron diffuses, dues à une accumulation de composés humiques. Structure pelliculaire.
$B_{fe}$ (15-45) : Ocre vif ; structure pelliculaire : grains de quartz enrobés. Racines bien réparties jusqu'à la roche-mère.
C : Grès rose en décomposition.

*Podzols humo-ferrugineux.*

Dans ce cas, on a choisi trois podzols situés soit sur grès vosgien (Biffontaine et Taintrux), soit sur granite de Kagenfels (Barembach). La description du profil type correspond au sol de Biffontaine.

*Situation :* Forêt communale de Biffontaine (Vosges) — Altitude 500 m — exposition Sud — roche-mère : grès vosgien — Végétation : Pin sylvestre, Callune, Myrtille.

*Profil.*

$A_0$ (0-8) : Mor fibreux brun noir, composé des couches L, $F_1$ et $F_2$ bien développées et d'un horizon H de faible épaisseur. Feutrage dense de racines d'Éricacées.
$A_1$ (5-8) : Gris noir à structure particulaire : riche en matière organique juxtaposée aux grains de quartz.
$A_2$ (8-55) : : Décoloré, cendreux ; texture sableuse meuble ; structure particulaire, traînées grisâtres humifères et taches blanchâtres.
$B_h$ (55-60) : Brun noir, horizon d'accumulation humique ; friable ; structure pelliculaire.
$B_{fe}$ (60-70) : Alios durci rouille vif, passant progressivement à la roche-mère rose.

Les résultats analytiques les plus caractéristiques de tous ces profils figurent au tableau 7.

2° *Méthodes d'étude.*

On a prélevé les horizons des profils étudiés en automne, à la fin de la retombée annuelle des feuilles. L'échantillonnage étant fait au hasard, en plusieurs points de récolte, chaque horizon

homogénéisé a été traité selon les techniques décrites antérieurement, en vue d'extraire les composés solubles dans l'eau et de doser les acides organiques.

TABLEAU 7

*Analyses des sols* (p. 100 de terre sèche à l'air)

| Sols | | *p*H ($H_2O$) | S (1) *p*H 7 | T (1) *p*H 7 | S/T | C | N | C/N | Argile | Fer libre |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Sol brun acide* | $A_1$ .... | 4,2 | 2,2 | 10 | 22 | 2,34 | 0,14 | 16,7 | 10 | 0,55 |
| | $A_2$ .... | 4,8 | 1,2 | 6,3 | 19,2 | 0,86 | 0,07 | 12,2 | 6 | 0,71 |
| | BC .... | 4,9 | — | — | — | 0,44 | 0,05 | 8,8 | 10,5 | 0,99 |
| *Sol brun lessivé* | $A_1$ .... | 5,4 | 12,02 | 16,15 | 73,2 | 2,68 | 0,25 | 10,7 | 22,6 | 2,28 |
| | $A_2$ .... | 4,25 | 4,20 | 15 | 28,0 | 2,10 | 0,13 | 16,1 | 29,1 | 2,77 |
| | B ..... | 4,8 | 8,86 | 17,75 | 49,8 | 1,27 | 0,09 | 13,8 | 35,6 | 3,39 |
| *Sol ocre podzolique* | $A_1$ .... | 3,4 | 1,28 | 19,9 | 6,4 | 8,52 | 0,28 | 30,4 | 4,0 | 0,23 |
| | $B_h$ ..... | 4,4 | 0,28 | 7,4 | 3,8 | 2,49 | 0,06 | 41,5 | 7,3 | 0,43 |
| | $B_{fe}$ .... | 4,5 | 0,27 | 5,6 | 4,8 | 0,97 | 0,03 | 29,4 | 7,7 | 0,62 |
| *Podzol humo-ferrugineux* | $A_o$ .... | 3,8 | 3,02 | 43,7 | 6,9 | 19,9 | 0,84 | 24,0 | — | 0,11 |
| | $A_1$ .... | 3,1 | 1,00 | 37,5 | 2,66 | 10,25 | 0,30 | 34,2 | — | 0,13 |
| | $A_2$ .... | 4,9 | 0,21 | 1,8 | 11,6 | 0,27 | 0,03 | 9,0 | 1,7 | 0,06 |
| | $B_h$ ..... | 4,1 | 0,28 | 15,6 | 1,7 | 2,58 | 0,14 | 18,4 | 11,5 | 0,35 |
| | $B_{fe}$ .... | 4,7 | 0,22 | 8,7 | 2,5 | 1,01 | 0,04 | 25,2 | 2,7 | 0,49 |

(1) m. e./100g.

## 2. *Résultats*

Considérons en premier lieu, la distribution générale des acides à l'intérieur de chaque profil (tabl. 8) ; on se rend aisément compte qu'il existe une divergence d'évolution capitale entre sols bruns lessivés ou acides et sols podzoliques : en effet, les premiers sont caractérisés par une diminution extrêmement brutale du taux des acides au niveau des mull ; les seconds, au contraire, sont marqués par une décroissance beaucoup plus atténuée des taux d'acides et même par une légère augmentation de ces composés en B*h*. Cette répartition apparaît de façon encore plus évidente à l'examen du graphique 2 où sont représentées les sommes des acides organiques en fonction des profondeurs. En raison des valeurs soit élevées (litières), soit faibles (humus) des sommes observées pour les sols à mull, on a utilisé une échelle logarithmique pour figurer ces chiffres.

Effectuons maintenant un examen plus approfondi des résultats et pour cela comparons les humus aux litières d'une part, les horizons profonds aux horizons $A_1$ d'autre part.

*Comparaison des litières et des humus* (tabl. 9).

Si on exprime en pourcentage la somme des acides des horizons $A_1$ par rapport à celle des litières, on constate que ce taux est soit faible (inférieur à 3) dans le cas d'un mull, soit élevé (supérieure à 25) dans le cas d'un moder ou d'un mor.

TABLEAU 8

*Répartition des acides aliphatiques et phénols hydrosolubles dans les profils étudiés*
(mois de prélèvement : novembre)

| Sol — Horizon Profondeur | Acides exprimés en p.p.m. du poids de sol sec à 105°C | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | mal. (1) | cit. | oxal. | succ. | lact. | gluc. | van. | *p*-hb. | *p*-cou. |
| *Sol brun acide* | | | | | | | | | |
| Litière (Hêtre) ..... | 1 160 | 232 | 157 | 684 | 93 | 21 | 35,6 | 30,1 | 28 |
| $A_1$ (mull acide 0-10 cm) .. | 5 | 7,7 | 9 | 11 | 9,2 | tr. | 0,55 | 0,3 | 0,05 |
| *Sol brun lessivé* | | | | | | | | | |
| Litière (Chêne) ..... | 197 | 142 | 125 | 221 | 98 | 72 | 11,5 | 8,6 | 6,5 |
| $A_1$ (mull 0-8 cm) ..... | tr. | tr. | 4 | 12 | 8,5 | 0 | tr. | 0,15 | tr. |
| $A_2$ (8-30 cm) ..... | 0 | 0 | 0,5 | tr. | tr. | 0 | 0 | tr. | 0 |
| B (30-55 cm) ..... | 0 | 0 | tr. | tr. | tr. | 0 | 0 | tr. | 0 |
| *Sol ocre podzolique* | | | | | | | | | |
| Litière (Pin-Chêne) ..... | 26 | 84 | 57 | 42 | 18 | 24 | 7,5 | 3,2 | 2,9 |
| $A_1$ (moder 2-10 cm) ..... | 8 | 36 | 15,6 | 14 | 7 | 5,3 | 1,05 | 0,17 | tr. |
| $B_h$ (10-20 cm)..... | tr. | 4 | 4,5 | tr. | tr. | tr. | 0,05 | 0,01 | 0 |
| $B_{fe}$ (20-45 cm) ..... | 0 | 2 | 4 | tr. | tr. | 0 | 0,01 | 0 | 0 |
| *Podzol humo-ferrugineux* | | | | | | | | | |
| $A_0$ (mor 0-5 cm) ..... | 15 | 46 | 27 | 35 | 23 | 18 | 2,6 | 2,3 | 1,5 |
| $A_1$ (mor 5-8 cm) ..... | 5 | 16 | 10 | 10 | 3 | 4,5 | 0,75 | 0,15 | tr. |
| $A_2$ (8-55 cm) ..... | tr. | 3 | 2 | tr. | tr. | tr. | 0,05 | 0,04 | tr. |
| $B_h$ (55-60 cm)..... | 0 | 5 | 3 | tr. | tr. | 0 | 0,08 | 0,04 | tr. |
| $B_{fe}$ (60-70 cm) ..... | 0 | 2 | 2 | tr. | tr. | 0 | 0,02 | 0,01 | 0 |

(1) Nous désignons les acides par les abréviations suivantes :
mal. : malique ; cit. : citrique ; oxal. : oxalique ; succ. : succinique ; lact. : lactique ; gluc. : glucuronique et galacturonique ; van. : vanillique ; *p*-hb. : *p*-hydroxybenzoïque ; *p*-cou. : *p*-coumarique.

*Comparaison des humus et des horizons profonds* (tabl. 10).

Si on rapporte en pourcentage la somme des acides des horizons profonds (A et B) à celle des horizons $A_1$, on observe encore des teneurs très faibles dans les sols à mull et à l'opposé, des taux élevés en faveur des sols podzoliques. On peut donc penser que la migration des acides organiques est pratiquement nulle à travers un profil de sol brun lessivé ou acide ; au contraire, il semble évident que ces composés s'infiltrent dans les horizons profonds des profils podzoliques.

### 3. *Conclusion*

Nos résultats font apparaître qu'il existe une corrélation très significative entre le devenir des acides organiques dans les sols étudiés (sol brun lessivé ou acide; sol ocre podzolique ou podzol) et les types d'humus fondamentaux: les divergences d'évolution observées seraient étroitement liées aux différences d'activité biologique de ces milieux.

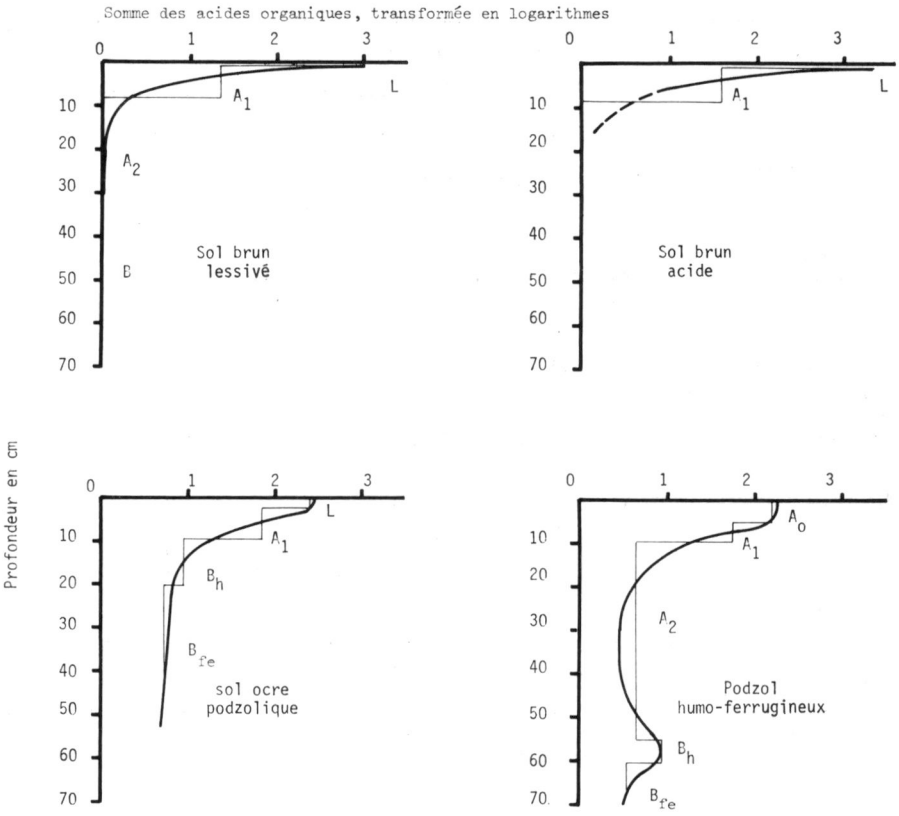



FIG. 2. — *Répartition des acides organiques hydrosolubles dans les profils étudiés.*

## TABLEAU 9

*Comparaison des litières et des humus : somme des acides exprimée en p.p.m. du poids sec à l'air*

| Somme des acides extraits des : | Sols à mull | | Sols à moder et à mor | |
|---|---|---|---|---|
| | Sol brun acide | Sol brun lessivé | Sol ocre podzolique | Podzol humo-ferrugineux |
| *a*) Litières ..... | 2 441 | 880 | 265 | 170 |
| *b*) Humus ..... | 42,8 | 24,6 | 87 | 49,4 |
| *c*) = *b* % de *a* ..... | 1,8 | 2,8 | 33 | 29 |

Dans un humus de type mull, les acides organiques disparaîtraient rapidement sous l'influence minéralisatrice d'une microflore très active.

A l'opposé, dans un moder ou un mor, caractérisés par une faible activité biologique, les acides auraient une durée d'existence assez longue et, semble-t-il, suffisante pour permettre leur lessivage en profondeur ; dans ce cas, on peut imaginer que ces composés formeraient des complexes solubles avec le fer et l'aluminium.

TABLEAU 10

*Comparaison des humus et des horizons profonds : somme des acides exprimée en p.p.m. du poids sec à l'air*

| Somme des acides extraits des : | Sols à mull | | Sols à moder et à mor | |
|---|---|---|---|---|
| | Sol brun acide | Sol brun lessivé | Sol ocre podzolique | Podzol humo-ferrugineux |
| *a*) Humus ..... | 42,8 | 24,6 | 87 | 49,4 |
| *b*) Horizons profonds : | | | | |
| $A_2$ et B ..... | non dosé | 0,5 * | | |
| $A_2$, $B_h$ et $B_{fe}$ .... | | | 14,5 | 17,2 |
| *c*) = *b* % de *a* ..... | | 2 | 16,7 | 35 |

(*) Quantité extraite de l'horizon $A_2$ seul, l'horizon B argillique ne contenant que des traces d'acides.

## III. — ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DES ACIDES ORGANIQUES OU BILAN DE LA PRODUCTION ANNUELLE D'ÉLÉMENTS COMPLEXANTS DANS UN SOL A MULL ET DANS UN SOL A MOR

Partant de l'étude des matières hydrosolubles, on vient de montrer le rôle prépondérant joué par les acides organiques simples dans la complexation du fer. Il paraissait alors logique de comparer la composition en agents complexants de litières fraîches améliorantes et acidifiantes ; mais les résultats obtenus conduisaient à une contradiction, car les litières génératrices de mull s'avéraient plus riches en éléments complexants que les litières génératrices de mor.

En fait, de telles expériences qui déterminent la composition interne des litières à un instant donné, ne peuvent expliquer les observations faites en milieu naturel ; en effet, elles négligent l'action des facteurs écologiques capables d'agir sur la durée d'existence des agents complexants :

— intensité de l'activité microbiologique du milieu ;
— vitesse de décomposition des litières ;
— devenir des acides organiques au cours des transformations chimiques et biologiques des matières végétales.

L'étude de la répartition des acides organiques dans les profils apporte déjà une réponse partielle à ce problème ; mais en vue d'établir un bilan précis des processus intervenant *in situ*, il convient maintenant d'évaluer sur le terrain la production

annuelle d'acides organiques, c'est-à-dire la quantité effective d'éléments complexants s'infiltrant à travers les horizons minéraux dans les sols à mull et à mor ; d'autre part, il semble indispensable d'expliquer les résultats obtenus sur le terrain par des expériences d'incubation *in vitro* des horizons étudiés.

## 1. *Recherches effectuées sur le terrain : évolution des horizons en place*

### A. — *Choix des sols et du matériel d'étude.*

Afin de suivre l'évolution saisonnière des acides organiques, nous avons choisi des horizons appartenant à deux sols décrits et analysés au chapitre précédent. Il s'agit :

1) d'une litière de Chêne ou litière du mull à décomposition rapide, et d'un mull actif de sol brun lessivé (Grande-Fraize) ;

2) d'une litière de Pin ou litière du mor (fraction L d'un xéromor fibreux comprenant les couches LFH) et d'un horizon $A_1$ (base du mor) de podzol humo-ferrugineux (Biffontaine, Vosges).

### B. — *Méthodes d'étude.*

1. *Dates de prélèvement et traitement du matériel.*

Le choix des dates tient compte des saisons et de périodes caractérisées par un facteur dominant tel le gel, la sécheresse... Les récoltes s'échelonnent aux époques suivantes :

1964 : Novembre au moment de la chute des feuilles de Chêne (4,8°C) (1).
1965 : Janvier, en période de gel (0,3°C).
Avril, par temps humide (9,3°C).
Juillet, au cours d'une période sèche (18°C).
Septembre, avant la chute des feuilles, pendant une période pluvieuse (14,8°C).
Novembre, à la chute des feuilles (4,8°C).
Décembre, au cours d'un hiver pluvieux (1,1°C).
1966 : Février, pendant une période pluvieuse (2,1°C).

Les prélèvements sont effectués en plusieurs points choisis au hasard, sur une surface de 300 m² et ensuite homogénéisés ; nous récoltons respectivement : environ 600 g de litière de Chêne, 1000 g de la fraction L du mor et 1 500 g des horizons $A_1$.

2. *Détermination des acides hydrosolubles.*

L'extraction et le dosage des acides organiques par chromatographie ont été effectués selon un protocole déjà décrit.

3. *Détermination du poids des litières à l'hectare.*

Cette évaluation *absolument essentielle*, permettra ultérieurement le calcul de la quantité d'acide libérée à l'hectare.

3. 1. *Litière de Chêne.*

La méthode de mesure la plus utilisée consiste à ramasser à l'aide d'un cadre de 50 × 50 cm, dix échantillons prélevés au hasard (Van Der Drift, 1963) ; il suffit alors de déterminer le poids de matière sèche à l'air. L'utilisation statistique des résultats permet de calculer le poids moyen de litière à l'hectare.

La litière étudiée, composée de feuilles de Chêne (80 p. 100) et de celles du sous-bois (Charme, Hêtre, Érable) fournit un poids moyen de 3,4 t/ha ± 0,37.

3. 2. *Mor : fractions L et F + H.*

On sait que les pseudophylles de Pin ne tombent pas saisonnièrement, mais que leur chute s'échelonne sur un cycle de végétation (Kendrick, 1958) ; d'autre part, les aiguilles de Pin et les apports de Callune, en raison de leur faible taux de décomposition, donnent naissance à un mor que nous subdivisons en deux fractions :

— L (3 cm) *sur laquelle porte notre étude,*
— F + H (3 cm, H très peu développé).

(1) Température mensuelle moyenne à Nancy.

Pour déterminer le poids de mor à l'hectare, MAC FEE et STONE (1965) mesurent la densité apparente et l'épaisseur de l'horizon organique, puis en déduisent le tonnage à l'hectare. Dans le cas de notre expérience, les résultats ainsi obtenus sont exprimés ci-dessous :

| Horizons | Épaisseur (cm) | Densité ($kg/dm^3$) | Poids (t/ha) |
|---|---|---|---|
| Mor L ..... | 3 | 0,12 | 36 ± 3 |
| Mor F + H ..... | 3 | 0,15 | 45 ± 4 |

Les chiffres observés pour le mor et pour la litière précédente sont en accord avec les mesures effectuées habituellement (REMEZOV, 1961 ; WITTICH, 1963).

4. *Vitesse de décomposition des litières.*

4. 1. *Litière de Chêne.*

Les feuilles de Chênes en mélange avec celles du sous-bois, disparaissent presque complètement chaque année ; leur vitesse de décomposition étroitement liée à l'activité biologique du milieu, varie avec la saison : forte au printemps et en été, elle est moins élevée en automne et faible en hiver ; elle est exprimée ci-dessous, parallèlement aux variations de poids de la litière, en pour cent du tonnage initial.

| | Novembre | Janvier | Avril | Juillet | Septembre |
|---|---|---|---|---|---|
| P.100 restant ..... | 100 | 95 | 75 | 45 | 25 |
| t/ha ..... | 3,4 | 3,23 | 2,55 | 1,53 | 0,85 |

4. 2. *Mor : litière de Pin.*

Comparée à celle des feuilles de Chêne, la décomposition des aiguilles de Pin est beaucoup plus lente. KENDRICK et BURGES (1962) suivent leur désagrégation et observent qu'elles mettent 7 à 10 ans pour parvenir au stade humifié. Il est donc possible, dans le cadre de cette étude annuelle, de considérer comme constante la masse du mor.

5. *Expression des résultats.*

La quantité d'acides hydrosolubles est exprimée à la fois par rapport au poids de matière sèche et par rapport à l'hectare. Dans le premier cas, les résultats traduisent la richesse en acides du matériel analysé ; dans le second, les chiffres permettent de comparer, à surface égale, la quantité d'acide effectivement libérée par chaque litière et pouvant intervenir dans les processus pédogénétiques.

## C. — *Résultats des recherches effectuées sur le terrain.*

### 1. *Résultats exprimés en poids par rapport à la matière sèche* (tabl. 11).

#### 1. 1. *Comparaison des litières.*

La première récolte a été effectuée fin novembre, à l'époque où la majeure partie des feuilles se trouve sur le sol ; dans ces conditions de départ, les acides organiques

dosés représentent des composés issus de litières en voie de transformations physico-chimiques et biologiques. On constate essentiellement que la litière de Chêne libère une quantité d'acides 5 à 10 fois supérieure à celle de la litière de Pin.

Au cours de la décomposition, l'évolution générale des acides est nettement différente dans les deux milieux : dans la litière du mull, la quantité d'acide observée diminue ou subit des fluctuations importantes, alors que dans celle du mor, le taux des acides varie peu ou tend à augmenter. Dans le détail, ces variations traduisent : d'une part une dégradation des acides ; celle-ci s'avère beaucoup plus intense dans le cas du Chêne ; d'autre part, dans les deux milieux, une synthèse des acides oxalique, succinique, lactique et phénoliques et dans le milieu podzol, une synthèse d'acide citrique.

TABLEAU II

*Évolution saisonnière : quantité des divers acides rapportée au poids de matière sèche à l'air*

| Échantillon Date de prélèvement | Acides en p.p.m. du poids sec à l'air | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | mal. (1) | cit. | oxal. | succ. | lact. | gluc. | van. | *p*-hb. | *p*-cou. |
| *Litière de Chêne :* | | | | | | | | | |
| Novembre | 152 | 110 | 103 | 133 | 107 | 80 | 12,8 | 7,3 | 6,6 |
| Janvier | 34 | 68 | 95 | 143 | 105 | 55 | 3,9 | 3,25 | 3,7 |
| Avril | 30 | 35 | 80 | 52 | 12 | 25 | 4,95 | 3,85 | 4,67 |
| Juillet | tr. | tr. | 110 | 170 | 190 | 5 | 2 | 2,15 | 0,25 |
| Septembre | tr. | tr. | 75 | tr. | 41 | tr. | 1,1 | 3,4 | tr. |
| *Mull :* | | | | | | | | | |
| Novembre | tr. | tr. | 3 | 10,5 | 9,5 | 0 | tr. | 0,15 | tr. |
| Janvier | 3 | 2 | 5 | 34 | 12 | 0 | 0,28 | 0,25 | tr. |
| Avril | 3 | 4 | 2 | 32 | 10 | 0 | 0,40 | 0,29 | 0,12 |
| Juillet | 0 | tr. | 7,5 | 6,3 | tr. | 0 | 0,14 | 0,16 | tr. |
| Septembre | tr. | tr. | 10 | 4 | tr. | 0 | 0,05 | 0,03 | tr. |
| *Mor : litière :* | | | | | | | | | |
| Novembre | 11 | 21 | 18 | 34 | 27 | 13 | 1,58 | 1,56 | 0,7 |
| Janvier | 7 | 14,5 | 29,3 | 36,3 | 29,8 | 16,5 | 4,03 | 1,46 | 1,4 |
| Avril | 5 | 79 | 43 | 46,5 | 33,5 | 29,5 | 6,95 | 2,12 | 3,3 |
| Juillet | 3 | 50,3 | 55 | 45 | 71,6 | 16,6 | 1,05 | 0,27 | 0,5 |
| Septembre | 10,7 | 72,8 | 40 | 42,5 | 88,3 | 19 | 2,64 | 0,70 | 1,2 |
| *Mor : $A_1$ :* | | | | | | | | | |
| Novembre | 3 | 11 | 7 | 10 | 3 | 5 | 0,53 | 0,10 | tr. |
| Janvier | 4 | 25 | 10 | 7,6 | tr. | 3 | 1,03 | 0,16 | tr. |
| Avril | 3 | 23 | 12 | 8,7 | tr. | 7,3 | 0,80 | 0,23 | 0,17 |
| Juillet | 2 | 24,7 | 13,3 | 13,8 | 4 | 5 | 0,83 | 0,24 | 0,05 |
| Septembre | 1 | 22,5 | 14 | 30,2 | 8 | 3,6 | 1,91 | 0,28 | 0,25 |

(1) Désignation des acides : voir note du tableau 8.
tr. = traces.

1. 2. *Comparaison des horizons $A_1$* (tabl. 11).

Dans le mull, le taux des acides solubles et en particulier celui de l'acide succinique, passe par un maximum en hiver et au printemps. Dans le mor, on observe, en toutes saisons, la présence en quantité abondante, de l'ensemble des acides identifiés, notamment des acides citrique et vanillique. Ces deux acides, qui représentent toujours une proportion importante des acides organiques dans le mor (surtout l'acide citrique) contribuent à opposer nettement les deux horizons $A_1$ (tabl. 12).

TABLEAU 12

*Comparaison des horizons $A_1$ : acides citrique ou vanillique pour cent des acides organiques*

| Horizons | | Novembre | Janvier | Avril | Juillet | Septembre |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Acide citrique | mull ..... | traces | 3 | 7 | traces | traces |
| | mor $A_1$ ..... | 27 | 49 | 41 | 38 | 27 |
| Acide vanillique | mull ..... | traces | 0,57 | 0,76 | 1 | 0,35 |
| | mor $A_1$ ..... | 1,32 | 2,01 | 1,45 | 1,29 | 2,32 |

1. 3. *Comparaison des litières et des horizons $A_1$* (tabl. 13).

En vue de comparer les horizons $A_1$ aux litières, on exprime soit globalement (somme), soit individuellement (composés les plus importants) les acides extraits des $A_1$ en pour cent des acides issus des litières.

Dans le mull, les taux restent faibles ; le taux le plus élevé (20,9 p. 100) observé au printemps, quand l'activité biologique est maximale, est dû à une forte diminution des acides dans la litière et à une augmentation de l'acide succinique en $A_1$.

Par contre, dans le mor, les pourcentages demeurent élevés en toute saison, en raison d'une persistance ou d'une augmentation des acides, à la fois dans la litière et dans la fraction $A_1$ du mor.

2. *Résultats exprimés en quantité d'acides à l'hectare.*

A partir du tableau 11, et en tenant compte de l'évolution saisonnière du poids des litières, on exprime maintenant la quantité d'acides organiques en gramme par hectare ; ces résultats sont consignés dans le tableau 14 et illustrés par la figure 3.

Au départ, si un gramme de litière de Chêne contient plus d'acide qu'un gramme de litière de Pin (cf. les résultats précédents), il n'en est plus de même lorsque l'on considère la quantité d'acide évaluée à l'hectare : *la litière du mor libère alors jusqu'à trois fois plus d'acide que celle du mull.*

Ce renversement de tendance serait encore beaucoup plus accentué si on tenait compte de la quantité d'acides également présente dans la fraction profonde du mor (F + H) ; dans ce but, il nous a paru intéressant d'effectuer un dosage des acides libérés par cette fraction, afin d'en déterminer l'ordre de grandeur ; les teneurs ren-

TABLEAU 13

*Comparaison des litières et des horizons $A_1$*

| Date de prélèvement | Acides extraits du mull % des acides extraits de la litière de Chêne | | | | | | Acides extraits du mor % des acides extraits de la litière de Pin | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Somme | cit. (1) | oxal. | succ. | van. | *p*-hb. | somme | cit. | oxal. | succ. | van. | *p*-hb. |
| Novembre | 3,2 | 0 | 3 | 7,9 | 0 | 2 | 31 | 55 | 39 | 29,6 | 34,6 | 6,4 |
| Janvier | 11 | 2,9 | 5,2 | 23,8 | 7,2 | 7,7 | 36,2 | 172 | 34 | 20,9 | 25,5 | 10,9 |
| Avril | 20,9 | 5,8 | 2,5 | 61,5 | 8,1 | 7,5 | 22,2 | 29,1 | 27,9 | 18,7 | 11,5 | 10,8 |
| Juillet | 2,9 | 0 | 6,8 | 3,7 | 7 | 7,4 | 26,3 | 50 | 24,2 | 30,7 | 79 | 89 |
| Septembre | 11,7 | 0 | 13,3 | 0 | 4,5 | 0,9 | 28,6 | 30,9 | 35 | 71 | 72,3 | 40 |

(1) Désignation des acides : voir note du tableau 8.

contrées respectivement dans les horizons L, et F + H, prélevées à la même époque (février 1966) sont les suivantes :

| | | mal. (1) | cit. | ox. | succ. | lact. | gluc. | van. | *p*-hb | *p*-cou. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mor | L | 21,5 | 85,8 | 46,7 | 55,4 | 45,1 | 34,5 | 3,5 | 1,7 | 3,3 |
| | F + H | 16,3 | 89 | 42,5 | 42,3 | 11,5 | 15,5 | 3,3 | 1,9 | 4,1 |

(1) Désignation des acides : voir note tableau 8.

Ces résultats prouvent bien que les deux fractions du mor libèrent des produits acides dans des proportions semblables : notamment les chiffres du tableau 14, qui se rapportent à la fraction L, du mor, pourraient être multipliés par un coefficient compris entre 1,5 et 2.

TABLEAU 14

*Évolution saisonnière : quantité des divers acides rapportée à l'hectare*

| Date de prélèvement | Poids de la litière (t/ha) | Teneur des acides : g/ha | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | mal. | cit. | oxal. | succ. | lact. | gluc. | van. | *p*-hb. | *p*-cou. |
| *Litière de Chêne* | | | | | | | | | | |
| Novembre ... | 3,4 | 516,8 | 374 | 350,2 | 452,2 | 363,8 | 272 | 43,5 | 24,8 | 22,1 |
| Janvier ..... | 3,23 | 109,8 | 219,6 | 306,9 | 461,9 | 339,2 | 177,7 | 12,5 | 10,5 | 12 |
| Avril ..... | 2,55 | 76,5 | 89,3 | 204 | 132,6 | 30,6 | 63,8 | 12,62 | 9,8 | 11,9 |
| Juillet ..... | 1,53 | tr. | tr. | 168,3 | 260,1 | 290,7 | 7,7 | 3,06 | 3,3 | 0,4 |
| Septembre ... | 0,85 | tr. | tr. | 63,8 | tr. | 34,9 | tr. | 0,9 | 2,9 | tr. |
| *Mor : litière de Pin* | | | | | | | | | | |
| Novembre ... | 36 | 396 | 756 | 648 | 1 224 | 972 | 468 | 56,9 | 56,2 | 25,2 |
| Janvier ..... | 36 | 252 | 522 | 1 055 | 1 307 | 1 073 | 594 | 145,1 | 52,6 | 50,4 |
| Avril ..... | 36 | 180 | 2 844 | 1 548 | 1 674 | 1 206 | 1 062 | 250,2 | 76,3 | 118,8 |
| Juillet ..... | 36 | 108 | 1 811 | 1 980 | 1 620 | 2 578 | 598 | 37,8 | 9,7 | 18,0 |
| Septembre ... | 36 | 385 | 2 621 | 1 440 | 1 530 | 3 179 | 684 | 95,0 | 25,2 | 43,2 |

tr. = traces.

Si maintenant on compare les variations saisonnières des deux litières, on note la même tendance évolutive constatée ci-dessus : baisse des produits acides pour la litière de Chêne, augmentation pour la litière de Pin ; *mais les différences observées sont considérablement amplifiées.* En effet, pour la litière du mull, la diminution des composés solubles est beaucoup plus accentuée, à l'exception de certains acides issus de fermentations microbiennes (oxalique, succinique, lactique) ; pour la litière du mor, certains maximuns atteignent parfois jusqu'à 4 fois la valeur observée à l'automne.

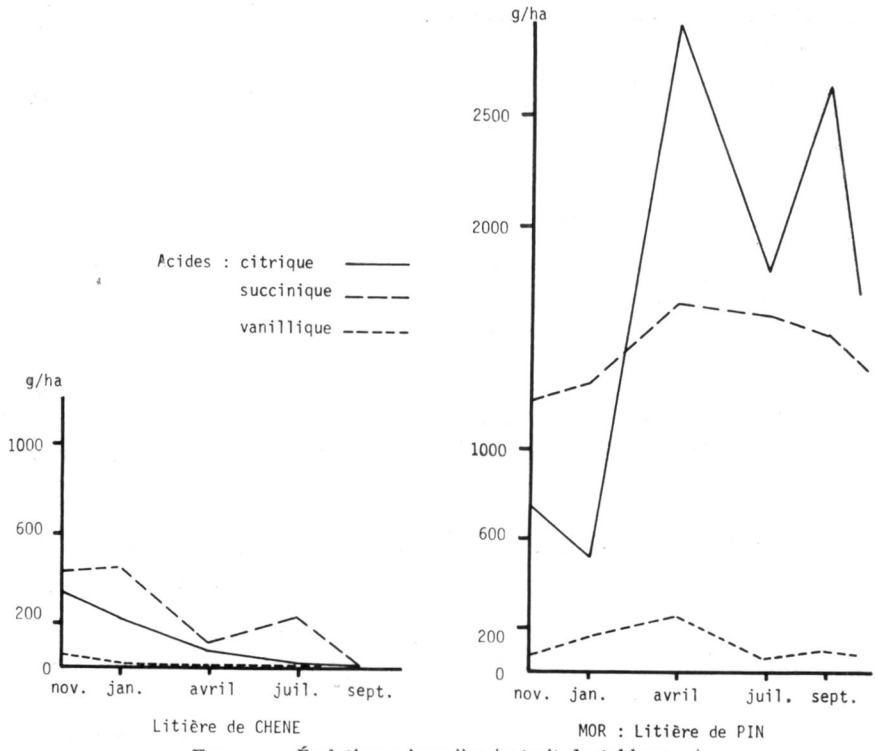



FIG. 3. — *Évolution saisonnière* (extrait du tableau 14).

D. — *Discussion.*

Nous analyserons les variations saisonnières des acides successivement au niveau des litières, puis au niveau des horizons $A_1$.

1. *Litières.*

Le taux des divers acides rapporté soit au poids de matière sèche soit à l'hectare, renseigne d'une part sur les variations de composition interne des litières, d'autre part sur les quantités d'acides réellement libérées par chaque litière et parvenant à l'horizon $A_1$.

*Les variations de composition interne des litières* sont la résultante de processus complexes, agissant dans des sens différents :

— d'une part, production biologique ou apports d'acides organiques nouveaux : synthèse au cours de fermentations diverses (GULYAS, 1967 ; LEWIS et STARKEY, 1969) ; apports entraînés des cimes par les pluies (COULSON *et al.*, 1960 *a et b* ; MORGAN et TUKEY, 1964) ou provenant d'exsudats racinaires (DEHAY et CARRE, 1957 ; VANCURA et HOVADIK, 1965).

— d'autre part, disparition d'acides par dégradation microbiologique ou lessivage (KAURICHEV et SHISHOVA, 1966).

C'est tantôt l'un de ces processus, tantôt l'autre, qui l'emporte, ce qui permet d'expliquer les fluctuations observées dans la composition des acides hydrosolubles.

Rappelons à ce sujet quelques idées bien établies et les applications qui peuvent en être tirées :

— en milieu biologiquement actif, les acides citrique et malique sont préférentiellement dégradés (NYKVIST, 1963) : aussi observe-t-on leur diminution rapide dans les litières du Chêne ou du mull ;

— en milieu acide et peu favorable au développement de la microflore, c'est la production de l'acide citrique qui est favorisée (WEHMER, 1893 ; MOLLIARD, 1922) ; il semble en être de même de l'acide vanillique, (JACQUIN, 1963 ; SUNDMAN, 1964) ; aussi observe-t-on l'évolution inverse de ces éléments dans les litières de Pin comparées à celles du Chêne ; non seulement ces acides ne diminuent pas, mais encore ils augmentent en début de saison ;

— l'accumulation des acides lactique et succinique est favorisée par les fermentations anaérobies ; il est donc normal que leur quantité augmente en période humide lorsque les litières sont saturées d'eau ; or, le printemps 1965 a été exceptionnellement humide, ce qui explique que ces acides montrent une courbe croissante dans les deux types de litières, mais de façon beaucoup plus accentuée dans les plus actives, c'est-à-dire dans les litières de Chêne ; cette accumulation est d'autant plus accentuée que les phénomènes de lessivage sont toujours réduits pendant la période de végétation, en raison de l'évapotranspiration.

*Si on tient compte de la vitesse de décomposition des litières* et si on exprime les quantités d'acides non en pourcentage de matière sèche, mais à l'hectare, les contrastes entre les différences évolutives des deux litières s'accentuent du fait de la disparition presque complète de la litière de Chêne à la fin de la saison de végétation, alors que le mor du podzol subsiste presque intégralement, les apports estivaux de nouvelles aiguilles de Pin compensant les pertes par minéralisation (KENDRICK, 1958).

Dans ces conditions, la presque totalité des acides organiques disparaît des litières de Chêne au cours de la décomposition, alors que les teneurs initiales se maintiennent ou augmentent fortement dans la litière de Pin.

L'acide citrique, réduit à des traces non dosables dès juillet dans la première, représente encore 2 500 à 3 000 g à l'hectare dans la deuxième. De même, en fin de saison, l'acide vanillique est 100 fois plus abondant dans le podzol que dans le sol à mull actif ; rappelons qu'il serait possible de doubler ces quantités, si nous tenions compte de la richesse en acides de la fraction F + H du mor.

Cette évolution apparaît avec une particulière netteté si on rapporte les quantités de chaque acide à la teneur initiale égale à 100 ; la figure 4 montre les variations obtenues concernant les acides les plus représentatifs des deux litières.

2. *En ce qui concerne les horizons* $A_1$, les mêmes tendances fondamentales précédentes s'observent au cours de l'évolution saisonnière. Mais l'opposition entre le mull et le mor est encore beaucoup plus accentuée du fait de la dégradation beaucoup plus rapides des acides organiques dans le premier milieu comparé au second.

En conclusion des recherches effectuées sur les milieux en place, l'action des différents facteurs entraîne les résultats généraux suivants :

— sur le mull, biologiquement très actif, les micro-organismes et la faune transforment très rapidement la litière et les produits solubles : les apports en acides ne compensent pas leur dégradation ; la litière ne s'accumulant pas, la quantité d'acide

est maximale à la chute des feuilles. D'autre part, les acides entraînés par les pluies sont rapidement métabolisés par la microflore du mull eutrophe ;

— au contraire, sur le mor, biologiquement très peu actif, les aiguilles de Pin s'accumulent pendant plusieurs années ; la quantité d'acides provient à la fois de la litière annuelle et de la décomposition du mor ; il y a donc renouvellement permanent de certains acides organiques dans le mor en cours de décomposition, alors que ce phénomène est beaucoup plus réduit dans le mull actif ; l'estimation effectuée à l'hectare met en évidence le rôle joué par la masse élevée du mor ; de ce fait, celui-ci constitue une source d'acides importante et constante en toute saison.

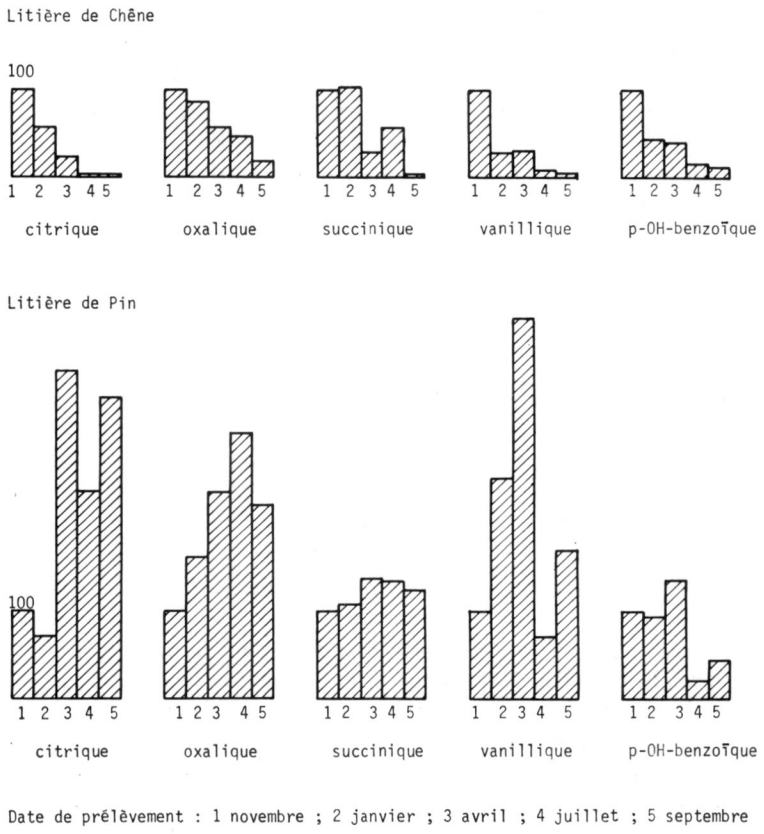



FIG. 4. — *Evolution saisonnière : acides rapportés à la teneur initiale égale à 100*

Ainsi, dans un sol brun lessivé, les acides hydrosolubles disparaissent à la fois dans la litière et dans le mull ; à l'inverse, dans un podzol, ces produits persistent dans toutes les fractions du mor.

En ce qui concerne les acides citrique et vanillique, nous avons tracé les courbes d'évolution saisonnière à partir du tableau 14 (fig. 3 : acides des litières en g/ha) ; la surface comprise entre chaque courbe et l'axe horizontal permet de comparer la quantité d'acide libérée par hectare et par an par les deux litières et d'établir le bilan

annuel suivant : l'horizon $L$ du mor libère par hectare et par an 14 fois plus d'acide citrique et 9 fois plus d'acide vanillique que la litière de Chêne.

D'autre part, la quantité d'acides citrique et vanillique périodiquement mesurée en $A_1$ (tabl. 13) et exprimée en p. 100 par rapport à celle des litières permet d'établir leur taux moyen de disparition : celui-ci atteint au plus 50 p. 100 dans le mor $A_1$ alors qu'il est voisin de 95 p. 100 dans le mull.

En tenant compte de ces deux données, il est possible de calculer la quantité d'acide parvenant au niveau de l'horizon $A_2$; ainsi, lorsque l'horizon $A_2$ d'un sol brun lessivé reçoit $1 \times 5 : 100$, soit 0,05 g/ha d'acide citrique ou vanillique, l'horizon $A_2$ d'un podzol s'enrichit de $14 \times 50 : 100$, soit 7 g/ha d'acide citrique et de $9 \times 50 : 100$, soit 4,5 g d'acide vanillique ; en effectuant les rapports 7 : 0,05 et 4,5 : 0,05, on constate alors que l'horizon $A_2$ d'un podzol reçoit par hectare et par an, 140 fois plus d'acide citrique et 90 fois plus d'acide vanillique que l'horizon $A_2$ d'un sol brun lessivé.

## 2. *Recherches effectuées* in vitro : *évolution des litières et des humus soumis à incubation*

Lors de l'étude saisonnière, nous avons mis en évidence à la fois la disparition (dégradation et lessivage) et la production des acides organiques. Il apparaît donc intéressant de vérifier les phénomènes naturels par des expériences et de comparer ainsi les résultats de laboratoire aux résultats de terrain.

### A. — *Méthodes d'étude.*

Outre les méthodes d'extraction, de purification et d'analyse des acides hydrosolubles, décrites précédemment, nous avons utilisé pour ces expériences de laboratoire, les protocoles particuliers rapportés ci-dessous.

1) *Date de prélèvement et traitement du matériel.*

Le sol brun lessivé (Grande-Fraize) et deux podzols humo-ferrugineux (Biffontaine et Taintrux) ont fourni le matériel de cette étude expérimentale. Les litières et les horizons $A_1$ déjà définis ont été récoltés en une seule fois à l'époque de la chute des feuilles de Chêne.

Pour amplifier les résultats, les deux litières desséchées à la température du laboratoire, ont été finement broyées : en effet, ce traitement augmente considérablement la quantité d'acides hydrosolubles extraite des litières ; Nykvist (1963) obtient un résultat identique, mais uniquement dans le cas des aiguilles de pin. Quant aux horizons $A_1$, pour accentuer les différences, nous les avons toujours enrichis par 20 p. 100 de litière broyée.

2) *Dispositif expérimental des incubations.*

Des prises de 60 g de litière de Chêne, 100 g de litière de pin ou 125 g d'horizons $A_1$ enrichis, sont placés dans des bocaux de 1 000 ml ; après une humidification égale à 100 p. 100 de l'humidité équivalente, les échantillons sont mis à incuber ; les bocaux, fermés seulement par un papier filtre, sont aérés une fois par semaine. Toutes les expériences sont effectuées en double exemplaire.

3) *Modalités des expériences.*

Une détermination préalable nous a permis de connaître la richesse en acides des échantillons broyés, secs à l'air ; par convention, nous désignerons ces teneurs initiales par l'expérience 0.

L'expérience 1, qui fournit la quantité d'acides d'un matériel ayant subi trois mois d'incubation à $20° \pm 1°C$, donnera surtout des indications sur les processus de dégradation des acides organiques.

L'expérience 2, qui renseigne sur la richesse en acide d'un matériel soumis à deux lessivages suivis d'incubation à $20° \pm 1°C$ pendant 3 mois, mettra en évidence les processus de synthèse biologique de ces composés.

B. — *Résultats et analyses des différents traitements* (tabl. 15).

1) *Teneurs initiales des échantillons: expérience 0.*

*Litière:* ce matériel fraîchement tombé fournit des résultats semblables à ceux rapportés lors de l'évolution saisonnière ; un gramme de feuilles de Chêne libère plus d'acides qu'un gramme d'aiguilles de Pin. D'autre part, les litières broyées libèrent des quantités d'acides jusqu'à 10 fois plus fortes que celles des litières non broyées (comparaison avec le tableau 11).

TABLEAU 15

*Évolution des litières et des humus soumis à incubation*

| Traitement et horizon | Acides : p.p.m. du poids sec à l'air | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | mal. (1) | cit. | oxal. | succ. | lact. | gluc. | van. | *p*-hb. | *p*-cou. |
| *Teneur initiale* | | | | | | | | | |
| Litière de Chêne ..... | 651 | 811 | 775 | 167 | tr. | 292 | 47 | 81 | 28 |
| Mull..... ..... | 25 | 78 | 92 | 76 | tr. | 36 | 17 | 22 | 10 |
| Mor { Litière ..... | 69 | 171 | 82 | 54 | tr. | 94 | 3,5 | 7 | 0,1 |
| Mor { $A_1$ ..... | 28 | 83 | 69 | 48 | 3 | 46 | 6,8 | 6,3 | 3,2 |
| *Incubé à 20°C* | | | | | | | | | |
| Litière de Chêne ..... | 0 | 0 | 62 | tr. | 13 | 0 | 0,5 | 1,6 | 4 |
| Mull..... | tr. | 1,5 | 25 | 18 | 12,5 | 0 | 0,06 | 0,25 | 0,04 |
| Mor { Litière ..... | tr. | 9,6 | 41,5 | 28,5 | 44 | 0 | 0,25 | 0,4 | tr. |
| Mor { $A_1$ ..... | tr. | 5,6 | 33,6 | 19,1 | 33,2 | 0 | 1,6 | 1,2 | 0,07 |
| *Prélessivé* | | | | | | | | | |
| Litière de Chêne ..... | 0 | 0 | 26 | 12,1 | 37,9 | 0 | 0,01 | 0,08 | tr. |
| Mull..... | tr. | 0 | 7,3 | 10 | 8,1 | 0 | 0,02 | 0,1 | 0,01 |
| Mor { Litière ..... | 0 | 2,5 | 19 | 15 | 28 | 3,5 | 0,03 | 0,11 | tr. |
| Mor { $A_1$ ..... | tr. | 14 | 21 | 11,9 | 14 | 4.5 | 0,09 | 0,06 | 0,01 |

(1) Désignation des acides : voir note tableau 8.
tr. = traces.

*Horizon $A_1$:* lors de l'extraction des $A_1$, les acides proviennent à la fois de l'horizon lui-même et de la litière ajoutée (20 p. 100). Le taux dû à l'enrichissement devrait atteindre théoriquement 1/5 de la teneur en acides des litières pures ; si nous constatons effectivement ce résultat pour le mor $A_1$, par contre pour le mull, les quantités observées sont jusqu'à 5 fois inférieures aux teneurs théoriques (cas de l'acide malique). Il est possible d'expliquer ce contraste par les propriétés physiques et chimiques du mull, entre autres par une fixation des acides sur le complexe absorbant ; cet aspect du problème sera envisagé ultérieurement.

2) *Échantillons incubés trois mois à 20° ± 1°C: expérience* 1.

La dégradation des acides organiques est effective dans tous les milieux : en effet, les teneurs dans les litières fraîches étant élevées au départ, les processus de décomposition l'emportent sur les processus de synthèse, bien qu'ils soient partiellement (ou

même totalement) compensés par ces derniers pour certains acides (par exemple l'acide lactique). Néanmoins, l'intensité des processus de minéralisation opposent les milieux « mull » aux milieux « mor » ; dans les premiers, le taux des acides baisse beaucoup plus fortement que dans les seconds au cours de l'incubation.

3) *Échantillons incubés après lessivages : expérience 2.*

Après deux lessivages intenses, les milieux sont très appauvris en matières hydrosolubles ; aussi la quantité d'acides déterminée doit correspondre sensiblement à celle de produits néoformés au cours des trois mois d'incubation. Dans tous les substrats, on note une production faible pour les acides phénols, beaucoup plus accentuée pour les acides oxalique, succinique et lactique ; de plus, uniquement dans les milieux podzoliques, on remarque la formation des acides citrique et glucuronique. Ces résultats montrent une concordance générale tout à fait satisfaisante avec ceux de l'étude saisonnière.

### 3. *Discussion générale*

Il ne paraît pas possible d'effectuer une comparaison quantitative rigoureuse entre les résultats obtenus au laboratoire et ceux obtenus sur le terrain : les conditions expérimentales du laboratoire sont en effet par trop différentes des conditions de terrain. Mais il est possible de comparer dans les deux cas, les tendances évolutives résultant du jeu des processus de dégradation et de synthèse et aboutissant, soit à une augmentation, soit à une diminution, voire dans certains cas, à une disparition complète des acides.

Or, en se limitant aux acides fondamentaux, on note les résultats suivants :

*Acide citrique.*

Comme sur le terrain, on observe en cours d'incubation, une dégradation exceptionnellement rapide dans la litière de Chêne et le mull (disparition presque totale, expérience 1), alors que la néosynthèse est nulle dans ces milieux.

La tendance inverse est constatée pour le mor ; la dégradation est relativement moins accentuée (expérience 1) alors que la néoformation est assez forte en L et même très forte en $A_1$ (expérience 2).

Ceci confirme remarquablement les résultats de terrain : *l'acide citrique disparaît en cours de décomposition dans les mulls, alors qu'il augmente dans les humus de podzol.*

*Acide oxalique.*

En ce qui concerne ce composé simple, on observe une évolution tout à fait comparable dans les expériences de terrain et de laboratoire. L'acide oxalique est minéralisé dans tous les milieux, mais moins rapidement dans le mor que dans le mull.

*Acide vanillique.*

Bien que portant sur des quantités moindres, les variations quantitatives de cet élément sont semblables à celles observées pour l'acide citrique : dégradation plus rapide dans les litières de Chêne et les mulls que dans les horizons de podzol ; néoformation biologique 3 à 4 fois plus forte dans les milieux podzoliques. *Là encore les observations de terrain sont confirmées.*

*Acides lactique et succinique.*

On avait observé, dans les expériences de terrain, la tendance à l'augmentation de ces éléments, favorisée par des conditions anaérobies (printemps humide saturant les litières) ; ceci est confirmé de manière très précise par l'expérience au laboratoire, surtout en ce qui concerne l'acide lactique : la formation de ce dernier élément est particulièrement importante puisqu'il augmente même fortement au cours de l'incubation à 20°C (expérience 1). Cette tendance s'observe en tout milieu biologiquement actif ou acide.

Ainsi, les résultats fondamentaux de l'expérience de terrain sont remarquablement confirmés par l'expérience de laboratoire :

Lorsque les acides organiques produits par la litière sont incorporés aux horizons $A_1$, soit par lessivage, soit par action biologique, ils sont métabolisés beaucoup plus rapidement dans le mull que dans le mor.

Les acides citrique, oxalique et aromatiques disparaissent dans les litières et les mulls actifs, en cours de décomposition, l'inverse s'observant dans les mors des podzols.

Dans les deux milieux, l'acide lactique et, à un degré moindre, l'acide succinique augmentent en conditions mal aérées, donc en période humide.

### 4. *Conclusion*

L'étude comparée de l'évolution des acides organiques originaires des litières, conduite simultanément *in situ* et au laboratoire, met en évidence des divergences très significatives entre sols lessivés (litière de Chêne, mull) et podzoliques (litière de Pin, mor).

Afin de tenir compte des principaux facteurs écologiques intervenant dans ces processus de variation, on a commencé par estimer l'évolution saisonnière du poids des litières ou des $A_0$ dans les deux stations ; au cours de l'année, le poids de la litière de chêne diminue rapidement et s'annule pratiquement en fin de saison de végétation ; au contraire, le poids de l'horizon L du mor peut être considéré comme constant.

Puis on a procédé à une évaluation saisonnière des quantités d'acides aliphatiques et phénols libérés par lessivage à la partie inférieure des litières et à la base des horizons $A_1$ ; les résultats obtenus ont permis de dresser un bilan annuel des quantités réelles d'acides susceptibles de traverser les horizons sous-jacents et de provoquer des migrations par complexation.

On observe essentiellement les faits suivants :

— au cours de la décomposition, la litière feuillue s'appauvrit très vite en acides (minéralisation) ; ces derniers persistent ou augmentent dans l'horizon L du mor (synthèse) ;

— les composés les plus représentatifs de cette évolution sont les acides citrique, oxalique, succinique, vanillique et p-hydroxybenzoïque ; les deux premiers et l'acide vanillique caractérisent les milieux « mor » ; l'acide succinique peut augmenter dans les milieux mor et mull en conditions humides (fermentations anaérobies), mais ce composé se distingue des autres acides aliphatiques par un pouvoir complexant très faible, voire nul vis-à-vis du fer et de l'aluminium, comme nous l'avons mentionné dans le premier chapitre.

Parmi les composés cités ci-dessus, les acides citrique et vanillique semblent d'une importance capitale : le premier réduit à l'état de traces dès juillet dans la

litière de Chêne, représente encore 2 500 à 3 000 g/ha dans l'horizon $L_1$ du mor ; l'acide vanillique, dosé en septembre, atteint 0,9 g/ha dans le premier milieu et 95 g/ha dans le second.

Pour ces deux acides, en évaluant la surface des courbes saisonnières, il est possible d'établir un bilan annuel dont le résultat est le suivant :

— le matériel résineux libère par hectare et par an, 14 fois plus d'acide citrique et 9 fois plus d'acide vanillique que le matériel feuillu ;

— le coefficient de disparition de ces deux acides, voisin de 95 p. 100 dans le mull atteint au plus 50 p. 100 dans le mor $A_1$ ; par un calcul simple, on déduit donc de ces deux données que *l'horizon $A_2$ d'un podzol reçoit 140 fois plus d'acide citrique et 90 fois plus d'acide vanillique que l'horizon $A_2$ d'un sol brun lessivé.*

Ces divergences d'évolution expliquent parfaitement les résultats obtenus à l'occasion des expériences portant sur la répartition des acides organiques dans les profils ; en effet, dans un horizon B de sol brun lessivé, on ne dose que des traces d'acides organiques ; par contre, dans les horizons $B_h$ et $B_{fe}$ des podzols, on observe constamment la présence de plusieurs composés, notamment des acides citrique, oxalique et vanillique.

En conclusion, la production annuelle d'acides organiques susceptibles de complexer et d'entraîner le fer ou l'aluminium, est bien plus forte dans les sols à mor que dans les sols à mull ; dans le premier cas, les conditions de milieu (activité biologique réduite, pauvreté en cations et en argile) permettent à ces éléments une durée d'existence plus longue et une migration effective à travers tout le profil ; dans le second cas, au contraire, les conditions de milieu (forte activité biologique, complexe argilo-humique du mull bien pourvu en bases) concourent à métaboliser ces composés en surface et au sein de l'horizon $A_1$. On peut alors se demander 1) quel est le rôle respectif des principaux acides dosés *in situ* vis-à-vis des cations et notamment des sesquioxydes ? 2) comment interviennent-ils dans les processus d'accumulation des colloïdes humiques et minéraux ? La réponse à ces questions fera l'objet du prochain chapitre.

*Reçu pour publication en août 1970.*

## SUMMARY

THE EFFECT OF SOLUBLE ORGANIC COMPOUNDS ON PEDOGENESIS IN AN ACID ENVIRONMENT. I. — FIELD STUDIES

The investigations presented here are concerning the formation, the movement and precipitation of organo-metallic complexes (Fe, Al) consisting of litters soluble compounds and developing under very or slight active biological conditions (soils with a mull or a mor humus). These complexing factors are including essentially simple organic acids and polymeric compounds, but, for a definite litter weight, the complexing power of the first substances is three times stronger than the power of the seconds.

Results obtained *in situ*, have allowed to determine with preciseness the main simple organic acids moving into the B horizons of soils : citric and oxalic (aliphatics), vanillic and *p*-hydroxybenzoïc (aromatics) acids. The study of their evolution during a vegetative cycle has shown that the annual production of organic acids able to complex and entrain the Fe or Al is much greater in mor soils than in mull soils.

## ZUSAMMENFASSUNG

### EINFLUSS DER LÖSLICHEN ORGANISCHEN VERBINDUNGEN AUF DIE BODENBILDUNG IN SAUEREM MILIEU. I. — UNTERSUCHUNG DES BODENS

Diese Untersuchungen betreffen die Bildung, die Wanderung und Ausfällung der metallorganische Komplexe (Fe, Al) gebildet von löslichen Verbindungen, entstanden aus Streue, die sich bei hoher biologischer Aktivität (Böden mit Mull) oder bei niedriger Aktivität (Böden mit Rohhumus) zersetzen ; diese Komplexbildungsagenzen bestehen hauptsächlich aus einfachen organischen Säuren und Polymerisaten, aber das Komplexbildungsvermögen der ersten Verbindungen für ein gewähltes Streugewicht ist dreimal höher als dasjeniege der Polymerisaten.

Die *in situ* erhaltenen Ergebnisse haben es ermöglicht die wichstigste einfache organische Säuren, die im Boden wandern, genau zu bestimmen :

— Citronen und Oxalsäure (aliphatische Säuren).

— Vanillin und Para-hydroxybenzoesäure (aromatische Säuren).

Die Erforschung ihrer Evolution im Laufe eines Wachstumszyklus zeigte, dass die jährliche Erzeugung organischer Säuren, die imstande sind das Fe oder Al zu komplexieren oder zu binden, stärker ist in den Böden mit Rohhumus als in den Mull-Böden.



## РЕЗЮМЕ

*Влияние растворимых органических соединений на почвообразование в кислой среде*.*

I. ИЗУЧЕНИЕ ПОЧВЫ.

С. БРЮККЕР.

Данное исследование касается образования, миграции и превращения в нерастворимые формы, органо-металлических комплексов (Fe — Al), основавшихся из растворимых соединений подстилки, и развивающихся в очень активной (почвы с мулем), или слабо активной (грубогумусовые почвы) среде; в эти комплексирующие агенты входят главным образом простые органические кислоты и полимеризованные соединения, причем, на данный вес подстилки комплексирующая способность первых в три раза превышает ту-же силу последних.

Результаты полученные *in situ* позволили с точностью определить главнейшие из простых органических кислот мигрирующих в почвах : лимонная и щавелевая (алифатические), ванильная и п-гидроксибензойная (ароматические). Изучение эволюции этих кислот в течении одного растительного цикла показало, что годичная продукция органических кислот способных комплексировать или увлечь Fe и Al в грубогумусовых почвах, превышает годичную продукцию тех-же кислот в почвах с мулем.


* Выдержки из докторской диссертации представленной на Научном Факультете Университета в Нанси 8-го Июня 1970.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (4), 453-455.

# CHRONIQUE DES LIVRES

DOMMERGUES (Y.), MANGENOT (F.). — ÉCOLOGIE MICROBIENNE DU SOL. — Un volume, Masson, Paris, 1970.

Cet ouvrage constitue une tentative de synthèse, la microbiologie du sol y étant présentée en fonction des diverses applications qu'elle peut avoir.

Évidemment dans un premier chapitre les auteurs rappellent les éléments constitutifs de la microflore tellurique, ce qui leur permet de dresser un tableau des différents organismes actifs.

Dans un deuxième chapitre, les auteurs abordent l'influence de cette microflore sur le milieu édaphique en montrant comment elle intervient pour déterminer un certain nombre de processus qui intéressent aussi bien le pédologue que l'agronome. Il s'agit tout d'abord du cycle des principaux éléments : carbone, azote, soufre, phosphore, fer, potassium et manganèse. Les autres divisions de ce chapitre concernent le rôle complexant, l'humification, la composition de l'atmosphère du sol, la genèse et la dégradation de la structure, etc...

La composition de la microflore du sol dépend elle-même du milieu et, dans un troisième chapitre, les auteurs étudient l'influence des facteurs naturels et des actions humaines, tel que l'emploi des pesticides, sur sa composition.

Le quatrième et le cinquième chapitres traitent enfin des interactions entre la microflore tellurique et la végétation et des interactions entre les microorganismes,

Cet ouvrage de 796 pages, 180 figures, 101 tableaux comporte une importante bibliographie. C'est donc un manuel qui pourra être consulté avec intérêt par des chercheurs de spécialités très variées qui y trouveront de nombreuses informations présentées d'une façon originale et une documentation leur permettant de compléter, le cas échéant, les connaissances qui leur seraient nécessaires à la poursuite de leurs travaux.

S. H.

SCHEFFER (F.), SCHACHTSCHABEL (P.). — LEHRBUCH DER BODENKUNDE (MANUEL DE PÉDOLOGIE). — Stuttgart, Ferdinand Enke Verlag, 1970, 7e éd., 448 p.

Peu de temps après la publication de la première édition en 1966, la préparation d'une édition révisée s'est avérée nécessaire. Les chapitres suivants ont été modifiés dans leur conception et transformés en fonction des résultats actuels de la recherche : échange de cations, acidité du sol, structure du sol, l'eau dans le sol en relation avec la théorie du potentiel, température du sol, potasse, phosphore, azote, dépôts argileux, influence de la nappe phréatique et des eaux stagnantes, latérisation, salinification, marécages.

On s'est particulièrement attaché à approfondir encore plus les rapports qui existent entre les différents chapitres, et à poser plus clairement les problèmes complexes.

Afin de permettre une meilleure compréhension, des exemples, empruntés au domaine de la pédologie appliquée, ont été insérés en nombre beaucoup plus important dans le texte.

SLAYTER (E. M.). — OPTICAL METHODS IN BIOLOGY. — New York, Wiley Interscience, 1970, 484 p.

La recherche dans le domaine biologique utilise largement la microscopie, la diffraction, la spectroscopie et bien d'autres techniques optiques et leur emploi demande une bonne compréhension des phénomènes optiques.

Le but de cet ouvrage est de permettre à des étudiants ou à des chercheurs en biologie possédant de bonnes notions de physique et de mathématiques de mieux utiliser les méthodes optiques à leur disposition.

Les premiers chapitres sont consacrés à l'énumération de principes optiques appliqués à l'instrumentation biologique.

Les chapitres suivants traitent de l'instrumentation optique utilisée en biologie à savoir : microscopie (lumière, contraste de phase, interférence, polarisation, électronique), photographie, détermination des propriétés optiques (absorption, luminescence, réfraction, pouvoir rotatoire), rayons X.

L'ouvrage n'est pas un traité et dans la mesure du possible, l'utilisation de longs calculs a été évitée, cependant l'interprétation des diagrammes de diffraction aux rayons X fait appel aux méthodes de Fourier.

CHRISTIANSEN-WENIGER (D. F.). — LES FORMES DE L'AGRICULTURE DANS LE BASSIN MÉDITERRANÉEN ET LE PROCHE-ORIENT D'APRÈS L'EXEMPLE DE LA TURQUIE. — Frankfurt am Main, DLG-Verlag, 1970, 500 p.

Les données exposées dans ce livre proviennent d'études personnelles effectuées pendant plusieurs années, de voyages d'étude, et surtout de la lecture de la bibliographie turque déjà abondante dans bien des domaines.

L'auteur connaît les problèmes agricoles de la Turquie grâce à des recherches effectuées en collaboration avec des scientifiques autochtones.

Plus l'auteur s'est penché sur les problèmes agricoles des différents pays méditerranéens, plus il a acquis la conviction que, sur la superficie relativement restreinte de la Turquie, on rencontre les principaux problèmes agricoles de l'ensemble des pays étudiés, de sorte qu'une étude approfondie de l'agriculture de la Turquie peut être considérée comme valable pour tous les pays du bassin méditerranéen et du Proche-Orient.

Après une brève esquisse de la morphologie, de l'anatomie, l'auteur décrit avec précision les conditions climatiques des différentes régions de Turquie, y compris celles des îlots climatiques et des nombreux climats localisés, et souligne leur importance quant à l'agriculture. On trouve ensuite l'analyse des conditions pédologiques au cours de laquelle l'auteur met l'accent tout particulièrement sur le rôle de la couche humifiée, les sols salins et sur le danger d'érosion du sol par le vent et l'eau. Nous disposons ainsi de toutes les données nécessaires à la compréhension des différentes formes de l'agriculture.

La mise en état du sol ainsi que les outils et machines nécessaires à cette réalisation sont étudiés. On trouvera encore la description du rôle et du déroulement des différentes méthodes de travail utilisées dans les différents types d'agriculture. L'auteur aborde enfin le problème de l'utilisation indispensable d'engrais minéraux industriels et d'appoint, et d'une technique judicieuse de semis. Il conclut en énumérant les mesures nécessaires à respecter pour fournir aux cultivateurs des semences ou des plants irréprochables.

PÉGUY (Ch.-P.). — PRÉCIS DE CLIMATOLOGIE. — 2e édition revue et remaniée, 468 pages, Masson 1970.

La seconde édition du *Précis de Climatologie* du professeur Ch.-P. PÉGUY vient de paraître, la première datait de 1961.

« Par rapport à notre première édition, écrit l'auteur en avant-propos, notre texte a non seulement été remanié dans sa substance — dans la proportion de plus d'un tiers — mais le plan même de l'ouvrage a été sensiblement modifié, soit pour mieux mettre en valeur des découvertes récentes, soit pour être mieux adapté aux exigences de l'enseignement ». Notons à ce sujet que sur les cinq sections que comprend l'ouvrage, la quatrième est consacrée aux « grands bilans naturels » : bilan de glace, évaporation et bilan de l'eau, bilan d'érosion, bilan organique, bilan thermique des animaux supérieurs ; ces synthèses sont donc groupées après l'étude des « éléments du climat », cela est logique et contribue à la clarté de l'exposé.

Ayant souligné le caractère de science appliquée de la climatologie, l'auteur insiste sur l'application à l'agriculture ; il termine ainsi le passage sur le « développement historique des sciences de l'atmosphère » : « En dernier lieu, ce sont les problèmes d'agronomie qui ont provoqué une dernière relance de la recherche climatique. Dans les régions arides... mais dans nos régions tempérées aussi pour lesquelles le problème de l'eau se pose en termes variés, et parfois aigus... »

Écrit par un géographe, ce livre intéresse directement les agronomes ; ils ont apprécié la première édition, celle-ci leur rendra de nouveaux services.

L. T.

LANDSBERG (H. E.), éd. — WORLD SURVEY OF CLIMATOLOGY, VOL. 2, GENERAL CLIMATOLOGY 2, edited by Flohn (H), Amsterdam, Elsevier, 1969, 266 p.

Cet ouvrage est le second d'une série consacrée à la climatologie dans le monde. Les trois premiers volumes traiteront de climatologie générale, tandis que les autres étudieront plus particulièrement les climats d'une région donnée. Actuellement, seul est publié le volume 2 dont les chapitres sont les suivants :

RIEHL (H.). Mécanismes de la circulation générale dans la troposphère.
DEACON (E. L.). Processus physiques près de la surface terrestre.
GEIGER (R.). Topoclimats.
FLOHN (H.). Vents locaux.
LAMB (H. H.). Fluctuations climatiques.

ANDRAE (H.). — NOUVEAUX PROCÉDÉS DE MESURE EN HYDROLOGIE. MÉTHODES DE BASE DE L'ÉLECTROHYDROMÉTRIE. — Paris, Dunod, 1970, 190 p.

L'ouvrage présenté par Dunod est une traduction légèrement modifiée de l'édition allemande *Neue Hydrometrische Verfahren*, München 1966.

Les contributions originales de l'auteur à l'amélioration des mesures hydrologiques y sont exposées. On trouvera notamment la description détaillée de nouveaux procédés de mesure de la température des eaux souterraines, des hauteurs piézométriques, de la direction et de la vitesse d'écoulement des nappes.

Une des préoccupations essentielles de l'auteur est l'automatisation et la centralisation des mesures, ce qui l'a conduit à imaginer un grand nombre de procédés électriques, électromécaniques ou électroniques de télémesure qui restent néanmoins très simples de construction et d'emploi. Dans de nombreux cas, les possibilités d'enregistrement sont signalées.

Ce livre qui contient également une présentation très générale des problèmes d'hydrologie en touchant à l'économie de l'eau, suit l'ordre chronologique des travaux de l'auteur et expose ainsi les différentes améliorations successives qu'il a apportées à une mesure.

F. A. D.

ESTIENNE (P.), GODARD (A.). — CLIMATOLOGIE. — Paris, A. Colin, 1970, 365 p. (Collection U.).

Se plonger dans un manuel de climatologie générale est souvent fastidieux. On y trouve la description et la classification de nombreux types de climats sans savoir pourquoi à tel endroit on a un climat chaud et humide, à tel autre froid et sec, etc.

Les auteurs de cet ouvrage, destiné aux étudiants de l'enseignement supérieur, ont su rendre attrayante l'initiation à la climatologie. Les grands types de climats mondiaux y sont décrits par les normales des éléments climatiques (température et précipitations notamment) ; mais ils sont également expliqués d'une manière dynamique. Pour cela, les auteurs n'ont pas ménagé leurs efforts puisque les deux premières parties de l'ouvrage sont consacrées d'une part à l'analyse des mécanismes élémentaires, d'autre part à la dynamique générale de l'atmosphère. Dans ces deux parties, qui occupent plus de la moitié de l'ouvrage, de nombreux schémas, cartes et graphiques permettent d'éviter l'usage de formules mathématiques souvent rebutantes.

Cet ouvrage est donc clair, facile à lire pour le profane en météorologie et constitue une bonne introduction à une étude plus complète des grands climats mondiaux. On peut cependant regretter que le lecteur ne soit pas alerté sur les problèmes de microclimats dont l'importance agronomique est au moins aussi grande que celle des macroclimats.

R. D.

# RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

*Au début de chaque mémoire*, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

*Les mémoires* seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons...; h) *références bibliographiques.*

*Les travaux originaux en anglais* doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

*Pour les autres documents* (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

*Les références bibliographiques* doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

*Pour les articles :* le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) : le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

*Pour les ouvrages :* le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus, le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

*Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies*, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponible est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée et porter les numéros des figures.

*Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils* seront envoyés *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

*Photographies :* Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

*Correction des épreuves :* les auteurs recevront une épreuve à corriger.

*Envoi du manuscrit :* M. Hénin, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

*Le Directeur de la publication:* M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 1-1971

*Dépôt légal: 1e trimestre 1971. N° d'impression: 1535.*

# ANNALES
# AGRONOMIQUES

VOLUME 21 1970 NUMÉRO 5

Numéro spécial
Les oligo-éléments en FRANCE

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, PARIS-7e

# LES OLIGO-ÉLÉMENTS EN FRANCE

## SOMMAIRE


| | | |
|---|---|---|
| Introduction | S. Hénin ..... | 467 |
| Rappel chronologique des principaux travaux effectués en France | M. Coppenet ..... | 469 |
| Les principes géochimiques de la distribution des éléments-traces dans les sols | G. Pédro et A.-B. Delmas | 483 |
| Influence de la fertilisation et de diverses techniques de culture sur l'alimentation des plantes en oligo-éléments | S. Trocmé ..... | 519 |
| Actions toxiques des oligo-éléments | C. Juste ..... | 549 |
| Le diagnostic des carences en oligo-éléments au moyen de l'analyse chimique des sols | L. Duval et J. Maurice | 573 |
| Exemples de problèmes régionaux : | | |
| I. — Le Massif armoricain | M. Coppenet ..... | 587 |
| II. — Le Sud-Ouest | J. Delas et A. Dartigues | 603 |
| III. — Le Sud-Est | P. Gouny et P. Cornillon | 617 |
| IV. — L'Est du Bassin parisien | P. Dutil ..... | 629 |
| Les carences en oligo-éléments chez les Ruminants en France. Leur diagnostic. Les problèmes soulevés par l'intensification fourragère | Simone Périgaud ..... | 635 |
| Les oligo-éléments en arboriculture et viticulture | Claire Huguet ..... | 671 |

# INTRODUCTION

A mesure que les variétés cultivées utilisées par les agriculteurs offrent des possibilités de production de plus en plus élevées, que les techniques culturales évoluent, que les zones cultivées se déplacent, la fertilisation pose de nouveaux problèmes. Si, pendant longtemps, elle a pu se limiter aux trois éléments majeurs : azote, acide phosphorique et potasse, on s'est aperçu depuis un certain temps déjà que d'autres éléments étaient nécessaires, non seulement à la suite d'expériences de laboratoire conduites dans des conditions plus ou moins artificielles, mais également d'après le comportement des cultures en plein champ.

Le cas de la chlorose est l'un des plus typiques et nous constatons dans l'historique présenté à ce sujet que les premiers travaux concernant ce problème remontent à 1843. Cet exemple doit être médité. Il indique que l'expérience avait montré aux agriculteurs que les terrains présentaient parfois des inaptitudes à porter certaines cultures. Les phénomènes de chlorose entraient justement parmi les critères qui permettaient de décider si un sol donné avait la « vocation » de la vigne, du pêcher ou du poirier.

On a récemment observé des carences sur des terres nouvellement mises en culture ou à la suite d'introduction de nouvelles productions dans des régions où elles n'étaient pas traditionnelles. Par exemple, c'est surtout dans le Bas-Rhône Languedoc que l'on observe les carences en molybdène, dans les Landes et en Bretagne que l'on constate des accidents dus à des teneurs insuffisantes en cuivre ou en manganèse.

Mais, parallèlement, l'accroissement des productions, l'abandon des fumures organiques ont également provoqué des accidents de ce type. En effet, quand on compare les besoins des plantes et les réserves du sol, on constate qu'en moyenne, la réserve en oligo-éléments est relativement plus élevée que la réserve en éléments majeurs. Pour des rendements moyens, des cultures adaptées à la vocation du milieu et des restitutions suffisantes, les phénomènes de carence n'apparaissent pas. Avec l'évolution actuelle, ceux ci se manifestent de plus en plus, il faut donc y pallier.

Mais on se heurte là à une autre difficulté. L'activité physiologique considérable des oligo-éléments fait que, s'ils sont nécessaires, leur excès devient rapidement néfaste. De ce fait, contrairement aux éléments majeurs, la gamme de concentration correspondant à l'optimum est assez étroite et il est donc nécessaire d'intervenir prudemment pour éviter des effets de toxicité. En outre, si la plante réagit, les animaux ont également certains besoins en ces éléments qui doivent, par conséquent, se trouver en quantité suffisante dans les rations. Enfin, le bétail, comme les végétaux, est susceptible d'être affecté par des teneurs excessives.

Les chercheurs des Stations agronomiques ont, à la suite des demandes posées par les agriculteurs, abordé les divers aspects de ce problème. Mais, ayant confronté l'ensemble de ces activités, nous avons été surpris de leur ampleur et il est apparu

nécessaire de les reconsidérer globalement. Il fallait au préalable faire le point ; c'est ce qui explique la parution de ce numéro spécial des *Annales agronomiques*, son plan et la façon dont les différents articles ont été rédigés.

M. TROCMÉ, Maître de recherches à la Station centrale d'Agronomie, à qui revient le mérite d'avoir coordonné ce travail, s'est efforcé de rassembler des témoignages. Le choix des thèmes correspond aux divers aspects du problème. L'historique de M. COPPENET retrace l'évolution des idées. MM. PEDRO et DELMAS précisent l'aspect géochimique de la question, ce qui permet de rattacher les problèmes de carence à la géologie et à la pédologie, d'évoquer la complexité des mécanismes qui commandent la mise en solution de ces éléments. Cette complexité constitue en soi un redoutable écueil pour l'agronome qui doit poser des diagnostics et trouver des remèdes.

Ceux-ci sont présentés d'une manière exhaustive par M. TROCMÉ qui montre comment les techniques culturales peuvent être à l'origine de ces accidents ou permettent plus ou moins d'y pallier. MM. COPPENET, DELAS, DARTIGUES, GOUNY, CORNILLON, DUTIL, Mme HUGUET précisent pour des régions données, des cultures particulières, les symptômes, les méthodes de diagnostic et les traitements ayant fait preuve d'efficacité.

Avec Mme PÉRIGAUD, porte-parole de l'équipe qu'anime au Centre de Recherches zootechniques de Theix le Docteur BROCHART, nous abordons les problèmes posés par l'alimentation des animaux. C'est un aspect capital pour l'herbager qui ne produit pas de l'herbe pour elle-même, mais pour une certaine fin.

Enfin, MM. DUVAL et MAURICE rappellent les précautions qu'il faut prendre pour interpréter correctement les analyses de sols. Ces jugements doivent tenir compte non seulement des teneurs inférieures à celles qui pourraient satisfaire certains besoins des plantes, mais également des teneurs provoquant des effets toxiques. De ce point de vue, M. JUSTE, en exposant ce dernier thème, a fort heureusement traité du cas de l'aluminium qui, s'il n'est pas oligo-élément, n'en figure pas moins en bonne place parmi les ions susceptibles d'avoir des effets toxiques.

Ainsi conçus, les articles ont été rédigés dans un certain esprit et les références bibliographiques font principalement état des travaux et des observations effectués dans le cadre de l'activité des Stations agronomiques. Il y a à cela une raison essentielle. Comme je le rappelais au début de cette introduction, c'est parce qu'il existait des problèmes ayant une certaine extension que les agronomes ont été amenés à les étudier. Il ne s'agit donc pas d'accidents observés dans des circonstances exceptionnelles, mais de situations intéressant des surfaces assez étendues où le succès des productions agricoles, végétales ou animales, se trouvait compromis.

Ce sont donc, en définitive, les praticiens eux-mêmes qui sont à l'origine de notre sélection, de même que ce sont leurs besoins qui orienteront nos futurs programmes de recherches, puisque telle est la mission de l'Institut national de la Recherche agronomique.

S. HÉNIN

*Ann. agron.*, 1970, **21** (5), 469-482.

# RAPPEL CHRONOLOGIQUE DES PRINCIPAUX TRAVAUX EFFECTUÉS EN FRANCE

M. COPPENET

*Station d'Agronomie,*
*Boulevard Kerguélen, 29 S - Quimper*
*Institut national de la Recherche agronomique*

RÉSUMÉ

Cet article passe rapidement en revue, dans l'ordre chronologique, les travaux français se rapportant aux carences d'oligo-éléments affectant les végétaux cultivés :

— avant la Seconde Guerre mondiale (1939) : chlorose ferrique des arbres fruitiers et de la vigne, carence en bore de la betterave ;

— après la Seconde Guerre mondiale (1948 à 1958) : carence en manganèse des céréales et des plantes maraîchères, carence en cuivre des céréales, trèfle-violet et petits pois, carence en zinc des arbres fruitiers ;

— de 1958 à aujourd'hui : carence en zinc du lin et du maïs, carence en molybdène des choux-fleurs et melons.

Il rappelle également les principaux travaux sur la carence en bore de diverses cultures dans diverses régions ainsi que ceux ayant trait à la guérison des chloroses ferriques en sols calcaires.

Enfin, on évoque les recherches concernant les teneurs des fourrages en oligo-éléments (Cu, Co, Se, Mo, Zn) et leurs incidences éventuelles sur la santé des animaux domestiques.

Entre 1843 et 1847, un Français, Eusèbe GRIS, a présenté à l'Académie des Sciences plusieurs Notes constituant, sans doute, les premières observations précises sur des essais de guérison de végétaux souffrant d'une maladie non parasitaire que l'on appellera, beaucoup plus tard, « maladie de carence ».

Le 2 octobre 1843, E. GRIS présente un mémoire relatif à l'action des composés solubles ferrugineux sur la végétation, dans lequel il se propose d'étudier l'action du sulfate de fer sur l'étiolement des végétaux et conclut de ses expériences que ce sel est un engrais stimulant, qu'il ne présente point de danger dans son emploi et que son effet est manifeste sur le principe colorant de la feuille.

En 1844 et 1845, on peut lire un résumé des conclusions auxquelles l'auteur précité a abouti (nous citons) :

« 1. Les ferrugineux solubles absorbés, soit par les spongioles radicellulaires

de la plante, soit par les pores épidermiques de ses feuilles, stimulent, revivifient la chromule comme ils revivifient l'hématosine du sang.

» 2. Ces composés raniment, fortifient la plante languissante et débile, comme l'animal languissant et débile.

» 3. L'action du fer est très probablement identique dans les deux règnes organiques.

» 4. L'animation de la chromule, sous l'influence des ferrugineux absorbés par les pores de la feuille, prouve, avec la dernière évidence, que l'action de ces composés est *spéciale*, c'est-à-dire tout à fait indépendante du sol.

» 5. Les stimulants salins sont impuissants sur la plante languissante et chlorosée.

» 6. Les composés ferrugineux stimulent très avantageusement la plante à l'état normal. »

Par plante à l'état normal, il faut entendre plante poussant en pleine terre. (N. D. L. R.)

Le 6 juillet 1846, E. Gris met sous les yeux de l'Académie quelques résultats des expériences qu'il poursuit au Jardin du Roi sur l'application des sels de fer à la végétation et spécialement au traitement de la chlorose végétale.

Les essais ont été poursuivis sur diverses plantes et, notamment, sur des arbres, chênes, châtaigniers, cognassiers, puis sur des Crucifères, des Solanées, des Rosacées, des Composées. Il est remarquable de voir que l'auteur a utilisé deux méthodes de traitement, l'absorption par les racines et l'absorption par voie épidermique ; enfin, il a vu également que les effets étaient d'autant plus rapides que la température était plus élevée.

A cette époque, les études de Sachs et de Knop n'étaient pas encore faites et ces études devaient permettre, en 1860, de conclure à l'utilité pour la vie des plantes, de sels apportant l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, le soufre, le magnésium et le fer. Pendant toute la seconde moitié du XIX^e^ siècle, on a cru à la seule nécessité de ces sept éléments, considérant que les autres éléments, reconnus dans la matière sèche des végétaux, n'étaient là qu'incidemment et parce qu'ils existent dans les sols.

Gabriel Bertrand devait faire accomplir, à l'aube du XX^e^ siècle, un grand pas à la biochimie et, en particulier, à la nutrition végétale, puisqu'il créa l'expression et la science des « oligo-éléments », à une époque où les esprits n'étaient pas mûrs et où il se heurtait à une incompréhension totale. En 1903, au Congrès international de Chimie pure et appliquée de Berlin, le président de séance refusa même l'insertion de sa communication, mais c'est de ses vues, qui paraissaient par trop révolutionnaires, que devaient découler quantités de recherches dans le monde entier, apportant les plus grands progrès à la biochimie et à l'agriculture. Le titre de la communication incriminée était : « L'expérimentation agricole du manganèse, du zinc, du bore, de l'iode et d'autres éléments pour compléter l'action fertilisante des engrais à base d'azote, de phosphore et de potassium. » On consultera, notamment, le livre de Goudot A. et Bertrand D., *Les oligo-éléments*, Paris, 1962.

Deux autres savants français, Javillier et Mazé, travaillant simultanément vers 1910, apportèrent, les premiers, la preuve de l'utilité du zinc pour les végétaux supérieurs, et spécialement, pour le maïs. Javillier présenta en 1912, au VIII^e^ Congrès international de Chimie appliquée se tenant aux États-Unis, une note relative

à l'emploi éventuel de sels de zinc à titre d'engrais catalytiques. Les vues de JAVILLIER étaient inspirées par des expériences de laboratoire effectuées sur *Aspergillus niger*, mais aussi par des expériences de plein champ où, en toutes circonstances, il avait obtenu, pour le maïs, des accroissements de rendement.

MAZÉ, en 1912, obtint des maïs carencés en zinc, à la suite de cultures sur solutions nutritives, avec des sels soigneusement purifiés, et par la suite, ce même auteur conclut à l'utilité pour les plantes du bore, du chlore, du silicium et de l'aluminium.

DUFRENOY et REED, dans leur mémoire aux *Annales agronomiques* de 1934, expliquent comment CHANDLER, en 1931, a mis en évidence, aux États-Unis, les causes du « Little leaf » ou « rosette » des arbres fruitiers, état pathologique qu'améliore rapidement et spécifiquement l'absorption de sels de zinc. Ces deux auteurs ont étudié, sur des Citrus affectés de « Mottle leaf », l'action de sels de fer et de zinc sur la structure cellulaire. Ils concluent que ces sels ont une influence spécifique sur les fonctions d'assimilation des feuilles, et qu'en leur absence les cellules présentent des symptômes pathologiques indiquant que l'équilibre est rompu entre le cytoplasme et ses inclusions (DUFRENOY et REED, 1934).

En 1935, sont signalées, également aux États-Unis, les premières carences zinciques sur maïs cultivés en plein champ.

AGULHON, collaborateur de Gabriel BERTRAND, avait montré, en 1910, que le bore augmente la production de matière sèche du blé, de l'avoine et du radis cultivés sur sable ainsi que la production du maïs, du colza et du navet cultivés en parcelles expérimentales. AGULHON en conclut que le bore est utile aux plantes supérieures et doit figurer dans le groupe des « engrais catalytiques », au même titre que le manganèse.

En 1923, Miss WARINGTON précise que le bore n'est pas seulement un stimulant de la croissance mais un élément indispensable à la vie même des végétaux supérieurs. Huit ans plus tard, BRANDENBURG (1931) confirme ces faits et, du même coup, ses propres expériences de laboratoire, en guérissant pour la première fois la « maladie du cœur de la betterave ». Cette « maladie du cœur de la betterave » avait probablement été remarquée depuis près d'un siècle, mais pas encore identifiée et, à ce propos, il est fort utile de relire le mémoire publié par G. BERTRAND dans les *Annales agronomiques* de 1939.

De 1933 à 1936, les agronomes français étudient la guérison de cette maladie de carence qui sévit en diverses régions du pays (FOEX et BURGEVIN, 1934, 1935; BRIOUX et JOUIS, 1935).

Nous devons nous préoccuper, dans ce numéro des *Annales agronomiques*, des cas bien définis, où les oligo-éléments ont posé des problèmes réels à l'agriculture française ; aussi, verrons-nous d'abord les problèmes de carence qui sont les plus importants. Historiquement, deux périodes sont à considérer :

Avant la dernière guerre, on ne s'était guère occupé que de la chlorose calcaire (carence ferrique) des arbres fruitiers et de la vigne, ainsi que de la maladie du cœur de la betterave et de celle du liège des pommes (carences boriques). Après cette guerre, avec la création de l'Institut national de la Recherche agronomique, en 1946, les prospections, les recherches, les expérimentations se sont intensifiées pour en arriver à l'état actuel, sans doute encore fort imparfait, mais permettant, tout au moins, de bien dominer la question des micro-éléments en production végétale.

Sur les sept éléments qualifiés d' « oligo-éléments » parce qu'ils sont indispensables aux végétaux supérieurs, seul le chlore ne pose pas de problèmes de carences aux agriculteurs.

Voici, très schématiquement, l'ordre des études effectuées en France (détection, guérison, diagnostic) :

— avant la Seconde Guerre mondiale :
*chlorose ferrique* des arbres fruitiers et de la vigne en sols calcaires,
*carence en bore*, maladie du cœur de la betterave ;

— années 1950 :
*carence en manganèse* des légumes (Achères),
*carence en manganèse* des céréales en Bretagne,
*carence en cuivre* des céréales, trèfles et pois en Bretagne et Landes de Gascogne,
*carence en zinc ou en bore* des arbres fruitiers ;

— années 1960 :
*carence en molybdène* des choux-fleurs et melons dans le Midi,
*carence en zinc* du lin et du maïs,
extension des connaissances sur la *carence en bore* dans diverses régions (arbres fruitiers, vigne, crucifères, luzerne),
poursuite des recherches sur les moyens de lutte contre la *chlorose ferrique* (chélates).

## AVANT ET PENDANT LA SECONDE GUERRE MONDIALE

### *1931*

Divers chercheurs venant de montrer le rôle de certains éléments-traces dans la nutrition végétale (Mn, Zn, B, Fe), BURGEVIN (du Centre national de la Recherche agronomique de Versailles) est parmi les premiers agronomes à se préoccuper de l'influence des « éléments dits catalytiques » sur le rendement, dans des cultures en vases de végétation. Pour cinq types de sols, il n'obtient pas d'excédents de production du Moha de Hongrie par l'addition aux engrais habituels d'une solution nutritive de MAZÉ apportant : Mg, Fe, Si, Zn, Mn, Al, B, F, I, As.

### *1933 à 1937*

BURGEVIN, en collaboration avec FOEX, étudie le traitement de la maladie du cœur de la betterave dans diverses régions françaises : le Loiret, le Loir-et-Cher, l'Eure-et-Loire, la Brie, la Sologne, la Mayenne, etc. Participent à ces travaux les directeurs des Services agricoles du Loiret et de la Mayenne, les Services techniques de la Société commerciale des Potasses d'Alsace (Bureaux d'Orléans et de Gien), le directeur du Syndicat des Agriculteurs de la Mayenne. Les doses de borate de soude

préconisées sont d'abord faibles (10 kg/ha), puis portées à 16 kg/ha. Aujourd'hui, on conseille 20 à 25 kg/ha, mais à cette époque, et cela était judicieux, les agronomes avaient une grande appréhension de la toxicité capable de résulter de l'emploi de doses trop fortes. Au-delà de 25 kg/ha, beaucoup de cultures souffrent, surtout si cette quantité est localisée au voisinage des racines et non pas mélangée à toute la masse de terre de la couche arable. Dans trois notes à l'Académie d'Agriculture, les deux auteurs précités font part de leurs observations concernant la réaction des sols carencés, l'influence de la désinfection de la semence, le mode d'application de l'acide borique ou du borate, la pluviosité de l'été.

*1935.* — BRIOUX et JOUIS de la Station agronomique de Rouen présentent, à leur tour, leurs observations sur un essai effectué dans la Seine-Inférieure.

### *1938 et 1944*

Du fait de l'impossibilité d'employer des sels ferreux dans la lutte contre la chlorose, DEMOLON et BASTISSE ont l'idée d'expérimenter les complexes minéraux ferrisiliciques qu'ils viennent de préparer et réussissent à guérir la chlorose du maïs poussant en milieu liquide. Dans leur second mémoire publié aux *Annales agronomiques* de 1944, ces mêmes auteurs relatent leurs succès obtenus dans la guérison de la chlorose de la vigne et des arbres fruitiers par divers modes opératoires : introduction de pseudo-solution dans le sol, injection subcorticale de gel, introduction du produit pulvérulent à l'intérieur de l'arbre, cette dernière technique étant la plus indiquée. BASTISSE a poursuivi, pendant plusieurs années, ses recherches dans cette voie jusqu'à l'apparition des chélates, complexes organiques qui se sont révélés plus efficaces que les complexes minéraux (BASTISSE, 1962).

### *1939 à 1942*

En 1940, une note de LEROUX à l'Académie d'Agriculture fait part d'une expérience, conduite en vases de végétation, sur le Petit pois, où le zinc et le cuivre, surtout, ont eu une action favorable alors que le plomb a eu une action dépressive. Cette expérience portait sur les éléments suivants : B, F, As, I, Cr, Mn, Cu, Zn, Pb, à raison de 2 à 5 mg par kilogramme de terre sèche provenant du domaine de l'École nationale d'Horticulture de Versailles, cette terre étant très riche en matières organiques.

Dès 1939, LAVOLLAY entreprend des essais sur végétaux supérieurs afin de rechercher si le molybdène y exerce la même fonction que chez la moisissure *Aspergillus niger*, c'est-à-dire une activation de l'enzyme effectuant la réduction des nitrates en sels ammoniacaux nécessaires à la synthèse des aminoacides.

Interrompu par les événements, LAVOLLAY effectue cependant en 1941 le premier essai français d'incorporation d'un engrais molybdique en plein champ. Il utilise, à cet effet, des boues résiduelles provenant du traitement industriel de la molybdénite et obtient un excédent de poids des fanes d'un haricot cultivé en sol à 26 p. 100 de calcaire (LAVOLLAY, 1942).

Nous remarquons que jusqu'à cette date, le molybdène n'était pas sur la liste des éléments dits « catalytiques » et que, dans les mélanges proposés par BURGEVIN, dont nous allons parler à l'instant, l'élément molybdène est également absent.

Au cours des quatre années de 1939 à 1942, BURGEVIN, voulant étendre son investigation sur les oligo-éléments à des cultures de plein champ, prépare des mélanges de divers sels minéraux et les fait expérimenter par une douzaine de Stations agronomiques réparties sur le territoire national. Il y avait ainsi deux mélanges séparés, le mélange A et le mélange B, apportant par hectare :

| *Mélange A* (kg) | | *Mélange B* (kg) | |
|---|---|---|---|
| $MgSO_4$, 7 $H_2O$ | 20 | $Na_2B_4O_7$, 10 $H_2O$ | 3 |
| $MnSO_4$, 4 $H_2O$ | 15 | NaF | 1,2 |
| $ZnSO_4$, 7 $H_2O$ | 7,5 | NaI | 0,9 |
| $CuSO_4$, 5 $H_2O$ | 7,5 | $Na_2AsO_4H$, 12 $H_2O$ | 0,9 |

Aucun essai, quels que soient la culture envisagée et le type de sol expérimenté, ne révèle un accroissement significatif des rendements. Il se trouve que le hasard, vu le nombre relativement petit d'essais, n'a pas permis l'implantation d'un champ en terrain nettement carencé, ce qui aurait d'ailleurs attiré l'attention de l'expérimentateur. Même dans des conditions de déficience caractérisée, les doses essayées n'auraient pas permis la guérison, mais nous avions déjà là des indications quant à l'action des éléments secondaires en l'absence de symptômes de carence.

*1941.* — L'extension du verger français sur de nouveaux sols de la région du Sud-Est posant le problème de l'adaptation des arbres fruitiers et de leurs porte-greffes aux sols calcaires, DROUINEAU (de la Station d'agronomie d'Antibes) met au point une méthode facile et rapide d'appréciation du pouvoir chlorosant des sols calcaires. Cette méthode, toujours utilisée de nos jours, a rendu les plus grands services et le dosage du « calcaire actif » permet le choix des porte-greffes ou éventuellement l'orientation des spéculations végétales projetées vers les terroirs les mieux adaptés.

## APRÈS LA SECONDE GUERRE MONDIALE

Comme nous l'avons déjà souligné, l'accroissement du nombre des chercheurs, le meilleur équipement des laboratoires et les liaisons de plus en plus fréquentes établies avec la profession ont permis de reconnaître, depuis une vingtaine d'années, de nouveaux cas de déficience des cultures provoqués par des carences d'oligo-éléments.

### *1948-1949*

Dans la région de Quimper, COÏC a l'attention attirée par de fréquents cas de dépérissements graves des céréales : avoine, orge, blé. Ces dépérissements sont le plus souvent irrégulièrement répartis sur l'étendue d'une parcelle et se révèlent être en liaison avec un récent apport d'amendements calcaires. Ces amendements étaient en général constitués par des calcaires marins, trez ou sable coquillier, maërl ou squelette du Lithothamne, et répartis à la main irrégulièrement et à forte dose. COÏC fait très vite l'association de l'élévation du pH avec la diminution d'assimilabilité d'un élément et entreprend les premiers essais de guérison de la *carence en*

*manganèse* ainsi que l'étude chimique des sols correspondants. En 1950, quelques agriculteurs sud-finistériens obtiennent des résultats spectaculaires dans leurs cultures de céréales et la pratique des pulvérisations va se généraliser au cours des années suivantes sur tout le département du Finistère, puis dans les Côtes-du-Nord et le Morbihan.

Pendant le même temps, les chercheurs de la Station centrale d'Agronomie de Versailles, sous la direction de BARBIER, mettent en évidence des *carences en manganèse* sur les cultures légumières des terrains d'épandage des eaux d'égout de la Ville de Paris ainsi que des *carences en zinc* sur arbres fruitiers. Dans la région d'Achères, les surfaces les plus fortement irriguées se distinguaient par une végétation dépérissante, chlorotique et ne produisant plus qu'un faible tonnage de légumes dépréciés. Ce phénomène, observé depuis environ 1925, venait d'être identifié par TROCMÉ, BARBIER, CHABANNES (1950), qui réussissent leurs essais de traitement par le sulfate de manganèse sur poireaux, épinards, pois, haricots, pommes de terre.

Les premières observations communiquées à l'Académie d'Agriculture sur la carence zincique du pommier en France l'ont été en novembre 1949 par CHABANNES, TROCMÉ et BARBIER, qui relatent le cas de pommiers Calville dépérissant à l'École nationale d'Horticulture de Versailles. A cette occasion, les auteurs signalent avoir vu des symptômes analogues sur pommiers Calville à la Station d'Arboriculture fruitière de Bordeaux et signalent, également, les mêmes symptômes rapportés par MICHON, du Comité régional d'Arboriculture fruitière de Paris, à Genay (Ain). L'année suivante, BARBIER et ses collaborateurs présentent une nouvelle Note sur une grave maladie de plusieurs vergers de pommiers et poiriers de la région d'Orléans, maladie qui se révélait aussi être une « maladie de carence zincique ».

DELMAS publiera, à son tour, en 1951, 1953 et 1955, ses observations effectuées dans le midi de la France sur la carence zincique des pêchers en Lot-et-Garonne, des pommiers dans la haute vallée du Tech (Pyrénées-Orientales) et des cerisiers de la région de Céret (Pyrénées-Orientales).

### *1952*

La carence en manganèse des céréales étant bien connue dans ses manifestations, la pratique des pulvérisations étant déjà vulgarisée à de nombreux agriculteurs bretons, COPPENET et JOLIVET montrent que l'impossibilité de la réussite du blé, de l'orge, de l'avoine, du petit pois et du trèfle-violet, en régions granitiques, est due à une *carence en cuivre*. Les parcelles cultivées n'ayant jamais reçu de traitement anticryptogamique à base de cuivre sont justiciables d'un enfouissement de sulfate de cuivre et il en est de même, bien entendu, des parcelles nouvellement défrichées dans ces mêmes régions. Le mémoire consacré au Massif armoricain dans ce fascicule donnera de plus amples informations à ce sujet. Quelques années plus tard, REDLICH (S. A. S., Gargenville S.-et-O.) et DELMAS (I. N. R. A., Bordeaux) découvrent des carences en cuivre dans les sols sableux des Landes de Gascogne.

### *1953-1954*

Au cours d'une conférence de TROCMÉ (1953), il est fait allusion aux carences en bore des arbres fruitiers en Sologne, mais voici que BRANAS apporte, à l'Académie

d'Agriculture, le fruit de ses observations sur le *plomb de la vigne*, manifestation de la carence en bore. Signalés dès 1951 par BASSET (directeur des Services agricoles des Pyrénées-Orientales), et dès 1953 par VALAT dans le département du Rhône, ces dépérissements sont fréquents et graves dans le Roussillon sur les sols du Villafranchien, plus rares sur les schistes siluriens de Banyuls-sur-Mer et sur les éboulis des Albères.

*1958*

Les premières *carences zinciques sur plantes annuelles*, le lin en l'occurrence, sont relatées par deux pathologistes étudiant un complexe de maladies cryptogamiques et d'une carence en zinc du sol. ANSELME et BOURGEOIS donnent le résultat de leurs travaux sur les cultures de lin de la Seine-Maritime, de la Somme et de l'Eure.

*1959*

Voici probablement les premières remarques françaises sur la manifestation d'une *carence en molybdène*. LAGAUDE (Protection des Végétaux, à Nîmes), après consultation de BERNAUX (Centre de Recherches agronomiques du Midi, Chaire de Botanique de l'E. N. A. de Montpellier), publie la description des symptômes observés sur choux-fleurs cultivés sur sols acides du Languedoc.

*1960-1962*

RUTTEN (Compagnie nationale d'aménagement du Bas-Rhône-Languedoc) signale des carences en molybdène sur cultures maraîchères et luzerne de la région nîmoise.

GOUNY et HUGUET (1961 et 1962) (Centre de Recherches agronomiques d'Avignon) font part, eux aussi, de leurs travaux sur la guérison de melons cultivés en sols non calcaires, par des pulvérisations de molybdate à 2 g pour 100 litres. BESSON (1962) (Protection des végétaux à Toulouse) signale à son tour cette carence dans le Tarn-et-Garonne et le Gers, ainsi que les bons résultats obtenus par pulvérisation de molybdate d'ammonium.

En 1960, DUVAL prospectant les régions orientales du Massif armoricain, constate que les grès siluriens et cambriens, qui couvrent d'importantes surfaces, sont originellement très déficients en cuivre et fait des observations sur cultures de céréales. Dans ces mêmes régions, il montre, en outre, que le granite dit « granite de Vire », est, contrairement aux granulites et granites de Bretagne occidentale, normalement pourvu en cuivre (DUVAL, 1963 et 1967).

*1961.* — Pour la première fois en France, ROUTCHENKO (Station d'agronomie de Bordeaux) détecte une carence zincique sur maïs dans les Basses-Pyrénées. Les travaux, poursuivis par DELMAS, DARTIGUES et LUBET (1963 et 1967) conduisent à une mise au point très complète des conditions d'extériorisation de cette déficience sur une culture aussi importante pour le Sud-Ouest.

*1964*

COPPENET et DUVAL remarquent, à leur tour, de fréquentes carences zinciques sur le maïs dès l'introduction de cette culture dans le Finistère.

Il faut, enfin, dire que de nombreuses observations sur le diagnostic ou l'extension des carences ont été effectuées de divers côtés sans donner nécessairement lieu à publications.

Nous venons d'examiner les faits saillants de la découverte des carences d'oligo-éléments en matière de production végétale mais nous avons laissé dans l'ombre divers travaux de recherche poursuivis dans le but d'approfondir tel ou tel point et aussi dans le but de prospecter de nouveaux terroirs. C'est ainsi qu'au cours des dix dernières années, des précisions sur la carence en bore ont été publiées, dont voici l'essentiel :

BARBIER et CHABANNES (1955), CHABANNES (1958) sur la rétention du bore dans les sols de la région parisienne ; JOUIS, LECACHEUX et CAUCHY (1960), sur la carence en bore des sols de limon du pays de Caux ;

DECAU (1960), DECAU *et al.* (1962), sur les carences en bore des terrasses de la moyenne Garonne et de la région toulousaine sur pommier, chou-fleur, luzerne, betterave fourragère, vigne ; GACHON (1964), sur une carence en bore de la luzerne dans le Massif granitique du Livradois en Auvergne ;

COPPENET (1965) sur les carences en bore existant en Bretagne.

Dans un autre domaine, celui de la guérison des chloroses ferriques, des recherches ont été poursuivies en liaison avec l'apparition sur le marché des chélates de fer :

CHABANNES, DUPRAT et TROCMÉ (1958) : traitement de la chlorose des poiriers dans la région parisienne ;

JUSTE, DELMAS, LASSERRE (1961) : rémanence de sels de fer et de séquestrats susceptibles d'être utilisés dans les vergers de la vallée de la Garonne ;

GUENNELON (1962) : les chélates de fer dans le traitement de la chlorose du poirier dans la basse vallée du Rhône ;

BASTISSE (1962) : rôle vecteur de divers anions minéraux ou organiques dans les phénomènes géochimiques et physiologiques.

De nombreux travaux de caractères très divers, qu'il ne nous est pas possible de noter ici, ont été également poursuivis en dehors des stations d'agronomie.

## LA TOXICITÉ DES ÉLÉMENTS MINEURS

Les excès naturels d'éléments-traces provenant d'une richesse excessive de la roche-mère ont rarement une incidence sur la production végétale mais les agronomes français ont eu à se préoccuper d'excès susceptibles d'être provoqués par des pratiques culturales tels que prévention de carences ou traitements anticryptogamiques. La généralisation des enfouissements boratés destinés à la betterave a attiré l'attention sur la sensibilité possible d'autres cultures. Dès 1936, BURGEVIN et d'autres directeurs de stations agronomiques avaient expérimenté sur la toxicité du borate de soude ou de l'acide borique suivant les types de sol.

Le problème des excès de cuivre provenant des traitements anticryptogamiques a donné lieu à un grand nombre de travaux dans les diverses régions de vignoble à partir de 1950 (Stations agronomiques de Colmar, Antibes, Blois, Bordeaux). Un mémoire consacré à la toxicité donne plus de détails dans ce numéro des *Annales agronomiques*.

## LES OLIGO-ÉLÉMENTS EN RAPPORT AVEC LA PRODUCTION ANIMALE

En 1951, MAROCKE et ANNE de la Station d'agronomie de Colmar ont l'attention attirée par une maladie du bétail semblant avoir une origine alimentaire et sévissant dans certaines exploitations vosgiennes du Haut-Voirimont.

Des analyses de sols et de fourrages montrent que les exploitations atteintes ont des sols et des fourrages moins riches en cobalt que les exploitations indemnes (MAROCKE, 1958).

En 1962, la Station d'agronomie de Quimper commence ses études sur le cobalt pour établir la corrélation existant entre la teneur des sols et la teneur des fourrages finistériens (COPPENET et CALVEZ, 1967).

FLON (1959) (directeur de la Station agronomique de Melun) confirme par ses analyses la richesse excessive en molybdène des terres de la région du Bassigny où des diarrhées du bétail sont observées.

Vers 1965, LAMAND suspecte, puis démontre que la myopathie du veau, sévissant dans le centre de la France, est bien occasionnée par une carence en sélénium (LAMAND, 1965). En France, les recherches dans ce domaine sont assez récentes et, de nos jours, les études principales sont poursuivies au Centre de Recherches zootechniques et vétérinaires de Theix (Puy-de-Dôme), Laboratoire de Physiopathologie de la Nutrition, sous la direction de BROCHART. Elles consistent, notamment, à établir des relations entre la teneur des sols ou des fourrages en oligo-éléments et certains troubles du bétail (voir plus loin : *Les carences en oligo-éléments chez les ruminants en France*, S. PÉRIGAUD).

Enfin, de son côté, la Station d'agronomie de Quimper se préoccupe du cuivre, du cobalt, du molybdène et du zinc dans le Ray-grass italien et le Maïs.

## CONCLUSIONS

Ce bref rappel historique ne fait que retracer les étapes principales de l'acquisition de la connaissance des manifestations de carences en oligo-éléments telles qu'elles se présentent dans les conditions de l'agriculture française. Il est certain qu'à ce jour, la science agronomique de notre pays est armée pour résoudre, en cette matière, les problèmes principaux posés aux agriculteurs, horticulteurs et arboriculteurs. Nous ne prétendons pas, toutefois, qu'il n'existe pas de lacunes, les terroirs de France sont nombreux et variés, les productions très diversifiées. Les changements fréquents de spéculation, les modifications des techniques culturales qui en résultent sont autant de causes capables de faire apparaître de nouveaux accidents imputables aux éléments mineurs, soit par défaut, soit par excès.

Nous remarquerons que tous les cas évoqués dans ce texte correspondent à

des guérisons de déficiences avec présence de symptômes pathologiques, bien peu d'améliorations, en effet, ayant été notées en l'absence de ces symptômes. Il en est autrement chez les animaux où les carences peuvent apparaître uniquement sur le rendement de l'élevage : croît quotidien, production laitière.

Remarquons encore que ces cas de carence sont vrais ou conditionnés par un facteur du sol (pH, calcaire, matière organique) et que nous avons peu d'exemples de déficiences provenant d'un appauvrissement progressif des sols cultivés.

Le domaine de la production animale est resté longtemps moins bien exploré mais nous venons de dire que la Recherche agronomique se préoccupe de recenser les troubles susceptibles d'être en relation avec l'alimentation en oligo-éléments et d'étudier les causes de variations de teneurs de ces mêmes éléments dans les fourrages.

*Reçu pour publication en juin 1970.*

## SUMMARY

### HISTORICAL REVIEW OF MAIN WORK CARRIED OUT IN FRANCE

This article broadly review in chronological order, French work relating to deficiencies of trace elements affecting cultivated plants :

— before the Second World War (1939) : iron chlorosis of fruit trees and vines, boron deficiency of beets ;

— after the Second World War (1948-1958) : manganese deficiency of cereals and market-garden crops, copper deficiency of cereals, purple clover and peas, zinc deficiency of fruit trees ;

— from 1958 to date : zinc deficiency of flax and maize, molybdenum deficiency of cauliflowers and melons.

The article recalls also the main work on boron deficiency in various crops and various regions, and on the cure of iron chlorosis on limestone soils.

Finally, reference is made to research on the oligo-elements content (Cu, Co, Se, Mo,Zn) of feeding stuffs and on their possible effects on the health of domesticated animals.

## ZUSAMMENFASSUNG

### ZEITLICHE FOLGE DER WICHTIGSTEN, IN FRANKREICH DURCHGEFÜHRTEN ARBEITEN

Der vorliegende Artikel gibt einen kurzen Überblick, in zeitlicher Folge, über die in Frankreich über Spurenelementekarenzen bei Anbaupflanzen durchgeführten Arbeiten :

Vor dem zweiten Weltkrieg (1939) : Chlorose durch Eisenmangel der Obstbäume und Reben, Borkarenz der Zuckerrüben.

Nach dem zweiten Weltkrieg (1948 bis 1958) : Mangankarenz der Getreide- und Gemüsepflanzen, Kupferkarenz der Getreidearten, des roten Klees und der Erbsen, Zinkkarenz der Obstbäume.

Von 1958 bis jetzt : Zinkkarenz bei Flachs und Mais, Molybdänkarenz bei Blumenkohl und Melonen.

In diesem Artikel werden ebenfalls die wichtigsten Arbeiten über Borkarenz bei verschiedenen Kulturpflanzen in verschiedenen Gebieten sowie die Arbeiten über die Heilung der durch Eisenmangel verursachten Chlorose in kalkreichen Boden behandelt.

Abschliessend werden Forschungen erwähnt über den Gehalt an Spurenelementen (Cu, Co, Se, Mo, Zn) bei Futterpflanzen und deren eventuelles Einwirken auf die Gesundheit der Haustiere.

## РЕЗЮМЕ

*Хронологический перечень главных французских работ по недостатку в микроелементах у культурных растений.*

М. КОППЕНЭ.

В данном труде вкратце рассматриваются в хронологическом порядке работы французских исследователей посвященные недостаточности культурных растений в микроелементах.

До второй мировой войны (1939) : железный хлороз фруктовых деревьев и виноградной лозы, недостаточность в боре у свеклы.

После второй мировой войны (1948-1958) : марганцевая недостаточность у злаков и овощных культур, медная недостаточность у злаков, красного клевера и зеленого горошка, цинковая недостаточность у фруктовых деревьев.

С 1958-го года — до настоящего времени : цинковая недостаточность у льна и кукурузы, молибденовая недостаточность у цветной капусты и дыни.

Автор напоминает также главные работы по борной недостаточности у различных культур в разных районах страны, и работы относящиеся к лечению железных хлорозов в известковых почвах.

В заключение он приводит также исследования по поводу содержания микроелементов (Cu, Co, Se, Mo, Zn) в кормах, и о возможных последствиях недостаточности в отношении здоровья скота.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AGULHON H., 1910. Emploi du bore comme engrais catalytique. *C. R. Acad. Sci.*, Paris 150, 288-291.

ANSELME Cl., BOURGEOIS M., 1958. Carence et maladie cryptogamique sur *linum usitatissimum*. *C. R. Acad. Agr.*, 195-200.

BARBIER G., CHABANNES J., TROCMÉ S., 1950. Sur un dépérissement de vergers aux environs d'Orléans. *C. R. Acad. Agr.*, 517-520.

BARBIER G., CHABANNES J., 1955. Sur la rétention du bore dans le sol et ses conséquences agronomiques. *C. R. Acad. Agr.*, 259-263.

BASTISSE E. M., 1962. Rôle vecteur de divers anions minéraux ou organiques dans les phénomènes géochimiques et physiologiques (5e mémoire). *Ann. agron.*, **13**, 379-389.

BERTRAND G., 1939. Sur la maladie du cœur de la betterave et son traitement par le bore. *Ann. agron.*, IX, 548-567.

BESSON J., 1962. La carence en molybdène du melon. *Phytoma*. Défense des cultures (134), 27-28.

BRANAS J., BERNON G., 1954. Le plomb de la vigne, manifestation de la carence en bore. *C. R. Acad. Agr.*, 593-596.

BRANDENBURG E., 1931. Die Herz-und Trockenfäule der Rüben als Bormangeler-scheinung. *Phytopathol. Zeits.*, **3**, 499-517.

BRIOUX C., JOUIS E., 1935. Action du bore sur la maladie de la betterave. *C. R. Acad. Agr.*, 1039-1042.

BURGEVIN H., 1931. Influence des éléments dits catalytiques sur le rendement dans les cultures en vases de végétation. *Rapport sur le fonctionnement de l'I. R. A.*, Paris, 191-192.

BURGEVIN H. et les directeurs des Stations agronomiques, 1939 à 1942. Recherches sur la fertilisation, *13e, 14e, 15e, 16e rapports annuels.*

CHABANNES J., TROCMÉ S., BARBIER G., 1949. Observations sur la carence zincique du pommier. *C. R. Acad. Agr.*, 624-626.

CHABANNES J., DUPRAT A., TROCMÉ S., 1958. Observations sur le traitement de la chlorose des poiriers. *C. R. Acad. Agr.*, 46-50.

CHABANNES J., 1958. Enquête sur les conséquences éventuelles d'applications répétées de borate aux terres cultivées. *C. R. Acad. Agr.*, 440-447.

COÏC Y., COPPENET M., 1949. Détection de carences en manganèse dans les terres humifères de Bretagne. *C. R. Acad. Sci.*, 1379 et *C. R. Acad. Agr.*, 323.

COÏC Y., COPPENET M., 1958. Sur la carence en manganèse des céréales dans les sols humifères de Bretagne. *Ann. Physiol. Vég.*, Suppl. II, 111-138.

COPPENET M., JOLIVET E., 1952. Détection de graves carences en cuivre dans les terres très humifères du centre de la Bretagne. *C. R. Acad. Agr.*, 691-693.

COPPENET M., DUVAL L., 1964. Détection de carences en zinc sur maïs dans le Finistère. *C. R. Acad. Agr.*, 449-456.

COPPENET M., 1965. Observations sur les carences en bore existant en Bretagne. *C. R. Acad. Agr.*, 140-149.

COPPENET M., CALVEZ J., 1967. Les oligo-éléments et, en particulier, le cobalt, dans les sols et les fourrages du Finistère. *C. R. Acad. Agr.*, 939-947.

DARTIGUES A., DELMAS J., LUBET E., ROUTCHENKO W., 1963. Premiers résultats sur l'étude de la carence en zinc dans le Sud-Ouest. *C. R. Acad. Agr.*, 266-279.

DARTIGUES H., LUBET E., 1967. Relation entre le pH du sol et la manifestation de la carence en zinc du maïs dans un secteur du bassin de l'Adour, possibilités et limites d'un diagnostic par l'analyse du sol. *Ann. agron.*, **18**, 285-299.

DECAU J., 1960. Premières observations de carence en bore sur les terrasses de la moyenne Garonne. *C. R. Acad. Agr.*, 1002-1008.

DECAU J., DUCOS R., PÉRODEAU J., PUJOL B., 1962. Nouvelles observations de carence en bore dans la région toulousaine. Carence de la vigne en sols argileux et argilo-calcaires formés sur molasses miocènes. *C. R. Acad. Agr.*, 733-737.

DELMAS H. G., BERNHARD R., 1951. La carence en zinc des arbres fruitiers. *B. T. I.* (60), 365-373.

DELMAS H. G., 1953. Sur un cas de dépérissement des pommiers dans la haute vallée du Tech (Pyrénées-Orientales). *C. R. Acad. Agr.*, 473.

DELMAS H. G., 1955. Le dépérissement des cerisiers de la région de Céret (Pyrénées-Orientales). *C. R. Acad. Agr.*, 333-337.

DEMOLON A., BASTISSE E. M., 1938. Sur quelques complexes colloïdaux du fer et de l'aluminium. *Ann. agron.*, **6**, 33.

DEMOLON A., BASTISSE E. M., 1944. Rôle vecteur de la silice dans les phénomènes géochimiques et physiologiques. Application au traitement de la chlorose ferrique. *Ann. agron.*, 265-296.

DROUINEAU G., 1941. Une méthode rapide d'appréciation du pouvoir chlorosant des sols calcaires. *C. R. Acad. Agr.*, 1132-1137.

DUFRENOY J., REED H. S., 1934. Effets pathologiques de la carence ou de l'excès de certains ions sur des feuilles de Citrus. *Ann. agron.*, 637-653.

DUVAL L., COPPENET M., 1960. Existence de carences en cuivre sur grès dans l'est du Massif armoricain. *C. R. des travaux des Stations agronomiques*, 12 R-14 R.

DUVAL L., 1963. Existence de graves carences en cuivre dans les sols gréseux de la Basse-Normandie et du Bas-Maine. *C. R. Acad. Agr.*, 1216-1220.

DUVAL L., 1967. Sur la teneur en cuivre des sols granitiques de la Basse-Normandie et du Bas-Maine. *Bull. de Mayenne-Sciences*, II, 91-98.

FLON H., 1959. (Cité par PEDRO G., 1968.) La prospection géochimique des éléments-traces dans les sols. *Rapport interne, Agronomie I. N. R. A.*, 71 p.

FOEX E., BURGEVIN H., 1934. Observations sur la maladie du cœur de la betterave. *C. R. Acad. Agr.*, 978-983 et 1935, 979-985, 1937, 195-199.

GACHON L., 1964. Carence en bore observée sur luzerne en sol granitique de l'Auvergne. *C. R. Acad. Agr.*, 210-215.

GOUDOT A., BERTRAND D., 1962. *Les oligo-éléments.* Presses Universitaires de France, 1 vol., p. 126, Paris.

GOUNY P., HUGUET F., MEYNADIER Y., 1962. Observations sur la carence en molybdène. *C. R. des travaux des Stations agronomiques*, p. 15 D.

GRIS E., 1843. Action des composés solubles ferrugineux sur la végétation. *C. R. Acad. Sci.*, **17**, 679, puis 1844, **19**, p. 1118, 1845, t. 21, p. 1386 ; 1846, t. 23, p. 53; 1847, t. 25, p. 276.

GUENNELON R., 1962. Les chélates de fer dans le traitement de la chlorose du poirier. *C. R. Acad. Agr.*, 209-213.

HUGUET F., 1961. Observations sur la carence en molybdène. *C. R. des travaux des stations agronomiques*, p. 13 D.

JAVILLIER M., 1912. L'utilisation du zinc comme engrais catalytique. *VIII^e congrès international de chimie appliquée.* (Washington et New York). Sect., 7, **15**, 145-146.

JOUIS E., LECACHEUX Th., CAUCHY F., 1960. Influence du pH sur la carence en bore des betteraves et des lins dans les sols de limon du pays de Caux. *C. R. Acad. Agr.*, 248-253.

JUSTE C., DELMAS J., LASSERRE M., 1961. Comparaison de la rémanence des sels de fer et des séquestrats susceptibles d'être utilisés dans les vergers de la vallée de la Garonne en sols chlorosants non ou très peu calcaires. *C. R. Acad. Agr.*, 168-171.

LAGAUDE V., 1959. Une maladie de carence du chou-fleur. *Phytoma*, Défense des cultures (108), 33-34.

LAMAND M., 1965 *a*. Le sélénium dans l'alimentation animale. *La revue de l'élevage*, 38^e n° spécial, 76-80.

LAMAND M., 1965 *b*. Syndrome myopathie-dyspnée : influence de la prophylaxie par le sélénium sur la composition biochimique du plasma chez le veau. *Ann. biol. anim. bioch. biophys.*, **5**, 309-315.

LAVOLLAY S., 1942. Un essai d'engrais molybdique pour la culture du haricot sur un sol en place. *C. R. Acad. Agr.*, 353-354.

LEROUX D., 1940. Influence de quelques « oligo-éléments » sur le développement d'une légumineuse. *C. R. Acad. Agr.*, 480-487.

MAROCKE R., 1958. Carence présumée en cobalt des fourrages produits en haute montagne vosgienne. Communication présentée au 24^e congrès international de la chimie industrielle, Paris, 1956 et publiée dans *Chimie et Industrie*, V. **79**, 782-784.

MAZÉ P., 1914. Influences respectives des éléments de la solution minérale sur le développement du maïs. *Ann. Inst. Pasteur*, **28**, 21-68.

ROUTCHENKO W., 1961. Détermination d'une carence en zinc sur maïs. *C. R. Acad. Agr.*, 739-741.

TROCMÉ S., BARBIER G., CHABANNES J., 1950. Recherches sur la chlorose par carence de manganèse des cultures irriguées à l'eau d'égout. *Ann. agron.*, **1**, 663-685.

TROCMÉ S., 1953. *Les éléments autres que l'azote, le phosphore et le potassium dans la fumure.* Centre de perfectionnement technique. Maison de la chimie, 28, rue Saint-Dominique, Paris. Fascicule n° 2977, 3-3-53.

WARINGTON K., 1923. The effect of boric acid and borax on the broad bean and certain other plants. *Annals of Botany* (Londres), **37**, 629-672.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (5), 483-518.

# LES PRINCIPES GÉOCHIMIQUES DE LA DISTRIBUTION DES ÉLÉMENTS-TRACES DANS LES SOLS

G. PÉDRO et A.-B. DELMAS

*Laboratoire des sols,*
*Station centrale d'Agronomie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles*
*Institut national de la Recherche agronomique*

## RÉSUMÉ

La teneur en éléments-traces des sols est fonction d'une part de la nature de la roche mère et des minéraux qui la constituent, et d'autre part du type d'altération qu'elle subit.

Elle dépend en effet du type pétrographique dans le cas des roches cristallines (éléments felsiphiles des roches acides ou éléments femaphiles des matériaux basiques), et de l'âge de ces formations. Pour les roches sédimentaires détritiques, elle est fonction de la proportion relative de minéraux primaires et de constituants secondaires.

La localisation de ces éléments-traces peut être variable :

Ils peuvent être dispersés au sein des réseaux silicatés des minéraux essentiels (éléments camouflés) ; leur existence est alors liée au phénomène de substitution défini par GOLDSCHMIDT (diadochie), un ion pouvant en remplacer un autre dans un réseau si leurs rayons ioniques sont proches, et si l'équilibre des charges est respecté. Dans d'autres cas, ce sont des constituants de minéraux accessoires (éléments *autonomes*) ou des éléments adsorbés dans les microfissures et à l'interface des minéraux principaux (éléments fissuraux).

— Au cours de l'évolution pédologique caractérisée par des réactions en solution aqueuse (hydrolyse, acidolyse, complexolyse), chaque élément est « libéré » plus ou moins vite suivant sa localisation et l'altérabilité du minéral qui le contient. Il réagit alors en fonction de caractéristiques physico-chimiques qui lui sont propres : pK (qui définit son existence sous forme d'ions simples ou hydroxylés ou salifiés ou enfin complexés) et rH (qui fixe son degré d'oxydation en fonction des conditions de milieu). La solubilité de chacune de ces formes permet de prévoir son degré de mobilité.

La comparaison de ces mobilités en conditions hydrolytiques, en présence de $CO_2$, ou en milieu complexant conduit à les classer en cinq grandes catégories : A, B, C, D et E (éléments à hydroxydes solubles, peu solubles, très solubles, éléments à hydroxyacides condensés et peu solubles, éléments à hydroxyacides simples et très solubles).

Ainsi le comportement de tout oligo-élément après extraction peut être rapproché de celui de la classe dont il fait partie.

A la surface du globe, où les conditions de milieu sont définies principalement par le processus pédogénétique, comme cela a été montré expérimentalement, on retrouve un comportement analogue. C'est ce que viennent aussi de confirmer des travaux récents portant sur des sols d'origine géographique et de nature très différentes.

Le but de ce travail consiste essentiellement à présenter les principales données qui résultent d'études géochimiques et cristallochimiques générales et qui permettent, dans une certaine mesure, d'indiquer et aussi de prévoir tout ce qui se rapporte aux éléments-traces dans les sols, sans avoir recours à une méthode directe qui repose par exemple sur l'analyse ponctuelle.

Pour poser convenablement le problème, il faut à ce sujet partir de la définition du sol ; on sait en effet que *le sol est le résultat de la transformation d'une roche mère de constitution donnée sous l'action de divers facteurs : facteurs climatiques, facteurs liés à la végétation, à la topographie, au temps...*

Or, si l'on adopte cette définition, on est amené à constater que la *teneur* en un élément-trace déterminé dans un certain horizon d'altération dépend de 2 sortes de données :

1. des données *pétrographiques*, qui commandent les questions concernant d'une part *l'abondance* de l'élément dans la roche mère et d'autre part *l'état* sous lequel il s'y trouve ;

2. des données *pédologiques*, relatives tout d'abord à la *nature* de l'évolution superficielle, puis à son *intensité* et enfin à sa *durée*. Aussi, ce sont ces 2 modes d'approche qui vont devoir être envisagés successivement.

## I. — LA DISTRIBUTION DES ÉLÉMENTS—TRACES DANS LES MINÉRAUX ET LES ROCHES

Le problème de la distribution des éléments-traces dans les minéraux et les roches doit être abordé sous 2 angles différents :

— l'un est lié à la *teneur* des diverses catégories de roches suivant leur nature, leur genèse, leur mise en place... C'est *l'aspect quantitatif brut*, qui a pour mission de dégager les lois de la répartition en fonction des principaux types de roches qu'on rencontre à la surface du globe ;

— l'autre s'intéresse à la *localisation* et à la *forme*, sous laquelle tel ou tel élément-trace se trouve dans le matériau. C'est le second aspect qui joue un rôle non négligeable quant à la *disponibilité* ou encore à *l'assimilabilité* des éléments au cours des phénomènes superficiels.

### A. — *Teneur en éléments-traces et leur répartition au sein de l'écorce terrestre* (MITCHELL, 1960 ; ARHENS, 1968)

A la lueur des travaux géochimiques récents, qui ont beaucoup bénéficié de l'amélioration des méthodes d'analyse et notamment de l'analyse spectrochimique, la composition de la lithosphère se présente aujourd'hui telle qu'elle est indiquée dans le tableau 1 (d'après GONI, 1966).

On remarque ainsi que :

— 12 éléments ont une teneur supérieure à 0,1 p. 100, on les appelle les *éléments majeurs* ; 8 d'entre eux ont une teneur plus grande que 1 p. 100 ; ce sont les éléments

## TABLEAU I

*Répartition des éléments suivant leur abondance dans la lithosphère* (d'après GONI, 1966)

### Éléments majeurs (> 0,1 %)

| | | |
|---|---|---|
| O | 466 000 | 8 éléments cardinaux = 98,59 % (> 1 %) |
| Si | 277 000 | |
| Al | 81 300 | |
| *Fe* | 50 000 | |
| Ca | 36 300 | |
| Na | 28 000 | |
| K | 25 000 | |
| Mg | 20 000 | |
| Ti | 4 400 | 4 éléments = 0,798 % |
| H | 1 400 | |
| *P* | 1 180 | |
| Mn | 1 000 | |

### Éléments-traces (< 0,1 %)

#### (> 1 p.p.m.)

| | | |
|---|---|---|
| F | 700 | 10 éléments = 0,318 % |
| *S* | 520 | |
| Sr | 450 | |
| Ba | 400 | |
| *C* | 320 | |
| Cl | 200 | |
| Cr | 200 | |
| Zr | 160 | |
| Rb | 120 | |
| V | 110 | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 14 éléments = 0,048 % | Ni | 80 | Sm | 7 |
| | *Zn* | 65 | Gd | 6 |
| | *N* | 46 | Pr | 6 |
| | Ce | 46 | Sc | 5 |
| | *Cu* | 45 | Hf | 5 |
| | Y | 40 | Dy | 5 |
| | Li | 30 | Sn | 3 |
| | Nd | 24 | *B* | 3 |
| | Nb | 24 | Yb | 3 |
| | *Co* | 23 | Er | 3 |
| | La | 18 | Br | 3 |
| | Pb | 15 | Ge | 2 |
| | Ga | 15 | Be | 2 |
| | Th | 10 | As | 2 |
| | | | U | 2 |
| | | | Ta | 2 |
| | | | W | 1 |
| | | | *Mo* | 1 |
| | | | Cs | 1 |
| | | | Ho | 1 |
| | | | Eu | 1 |
| | | | Tl | 1 |

22 éléments = 0,006 5 %

#### (< 1 p.p.m.)

| | | |
|---|---|---|
| Tb | 0,9 | 22 éléments = 0,000 4 % |
| Lu | 0,8 | |
| Hg | 0,5 | |
| *I* | 0,3 | |
| Sb | 0,2 | |
| Bi | 0,2 | |
| Tm | 0,2 | |
| Cd | 0,2 | |
| Ag | 0,1 | |
| In | 0,1 | |
| *Se* | 0,09 | |
| Ar | 0,04 | |
| Pd | 0,01 | |
| Pt | 0,005 | |
| Au | 0,005 | |
| He | 0,003 | |
| Te | 0,002 | |
| Rh | 0,001 | |
| Re | 0,001 | |
| Ir | 0,001 | |
| Os | 0,001 | |
| Ru | 0,001 | |

dits *cardinaux*, qui participent aux constituants essentiels de l'écorce silicatée : O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K et Mg.

— *Tous* les autres éléments ont une teneur inférieure à 0,1 p. 100 et sont dits *éléments-traces*. Mais naturellement, ils sont plus ou moins abondants ; signalons d'ailleurs que seuls, un certain nombre d'entre eux paraissent actuellement jouer un rôle essentiel sur le plan du développement des organismes végétaux et animaux : S, B, Cu, Zn, Co, Mo, Se... (en dehors de N et C) (1).

Mais la teneur moyenne (2), à partir du moment où elle a servi à classer les divers éléments d'après leur abondance globale, ne présente plus, en ce qui nous concerne, d'intérêt majeur. En revanche, ce qui est fondamental porte sur tout ce qui touche aux lois de la répartition des éléments-traces dans les différents types de roches. Or, trois sortes de facteurs président à cette répartition :

— l'un est essentiel, c'est le *type pétrographique* ;

— les deux autres sont complémentaires ; il s'agit de la *localisation géographique* (province géochimique) et de *l'âge de la mise en place* (période géologique).

1. *Rôle du type pétrographique* (*genèse et mise en place*).

La teneur moyenne de diverses catégories de roches, telle qu'elle est indiquée dans le tableau 2, montre que la répartition des éléments-traces peut être très variable suivant la nature pétrographique. A ce sujet, nous considérerons plus spécialement deux cas :

— celui des roches cristallines endogènes ;

— celui des roches sédimentaires détritiques.

a) *Cas des roches endogènes.*

Si l'on considère les roches éruptives, le graphique schématique dû à LAPADU-HARGUES (1968) (fig. 1) fait apparaître immédiatement que la distribution n'est pas anarchique ; certains éléments, en effet, tendent à être plus abondants dans les roches acides, tandis que d'autres sont plus concentrés dans les roches basiques.

Ainsi, SHAW (1964) a été amené à classer les éléments-traces en 3 catégories :

1. Les éléments *felsiphiles*, dont la teneur est plus élevée dans les roches silicatées de type acide que celle correspondant à la moyenne de la lithosphère :

Be, Li, *Mo*, Sn, Zr, Pb, Ra, Rb, Cs...

2. Les éléments *femaphiles*, dont la teneur dans les roches basiques est supérieure à celle de l'écorce terrestre :

Cr, *Ni*, *Co*, *Cu*, V, *Zn*, *Mn*, Sc, Ag...

3. Les éléments *homéophiles*, qui sont intermédiaires ou peu connus :

*B*, Ga, W, Sr...

(1) D'une façon générale, les éléments-traces indispensables au développement des organismes vivants seront mis en italique dans le texte.

(2) La teneur moyenne d'un élément a été appelée *clarke* par VERNADSKY ; c'est une unité qui permet d'évaluer d'une façon commode, soit l'enrichissement, soit l'appauvrissement d'un matériau quelconque de la lithosphère.

TABLEAU 2

*Composition chimique moyenne de diverses roches en éléments-traces* (p.p.m).

| | | Roches cristallines | | | | Roches sédimentaires | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N° AT. | Élément | Roches ultrabasiques (V) | Basaltes (V) | Roches neutres (V) | Granites (V) | Argiles et Schistes (V) | Grès (T et W) | Roches carbonatées (T et W) |
| 3 | Li | 0,5 | 15 | 20 | 40 | 60 | 15 | 5 |
| 4 | Be | 0,2 | 0,4 | 1,8 | 5,5 | 3,0 | 0,x | 0,x |
| 5 | B | 1,0 | 5,0 | 15,0 | 15,0 | 100,0 | 35,0 | 20 |
| 6 | C | 100 | 100 | 200 | 300 | 10 000 | | |
| 7 | N | 6 | 18 | 22 | 20 | 600 | | |
| 9 | F | 100 | 370 | 500 | 800 | 500 | 270 | 330 |
| 16 | S | 100 | 300 | 200 | 400 | 3 000 | 240 | 1 200 |
| 17 | Cl | 50 | 50 | 100 | 240 | 160 | 10 | 150 |
| 21 | Sc | 5 | 24 | 2,5 | 3 | 10 | 1 | 1 |
| 23 | V | 40 | 200 | 100 | 40 | 130 | 20 | 20 |
| 24 | Cr | 2 000 | 200 | 50 | 25 | 100 | 35 | 11 |
| 27 | Co | 200 | 45 | 10 | 5 | 20 | 0,3 | 0,1 |
| 28 | Ni | 2 000 | 160 | 55 | 8 | 95 | 2 | 20 |
| 29 | Cu | 20 | 100 | 35 | 20 | 57 | *x* | 4 |
| 30 | Zn | 30 | 130 | 72 | 60 | 80 | 16 | 20 |
| 31 | Ga | 2 | 18 | 20 | 20 | 30 | 12 | 4 |
| 32 | Ge | 1 | 1,5 | 1,5 | 1,4 | 2 | 0,8 | 0,2 |
| 33 | As | 0,5 | 2 | 2,4 | 1,5 | 6,6 | 1 | 1 |
| 34 | Se | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,8 |
| 35 | Br | 0,5 | 3 | 4,5 | 1,7 | 6 | 1 | 6,2 |
| 37 | Rb | 2 | 45 | 100 | 200 | 200 | 60 | 3 |
| 38 | Sr | 10 | 440 | 800 | 300 | 450 | 20 | 610 |
| 39 | Y | | 20 | | 34 | 30 | 40 | 30 |
| 40 | Zr | 30 | 100 | 260 | 200 | 200 | 220 | 19 |
| 41 | Nb | 1 | 20 | 20 | 20 | 20 | 0,0*x* | 0,3 |
| 42 | Mo | 0,2 | 1,4 | 0,9 | 1 | 2 | 0,2 | 0,4 |
| 47 | Ag | 0,05 | 0,1 | 0,07 | 0,05 | 0,1 | 0,0*x* | 0,0*x* |
| 48 | Cd | 0,05 | 0,19 | | 0,1 | 0,3 | 0,0*x* | 0,035 |
| 49 | In | 0,013 | 0,22 | | 0,26 | 0,05 | 0,0*x* | 0,0*x* |
| 50 | Sn | 0,5 | 1,5 | | 3 | 10 | 0,*x* | 0,*x* |
| 51 | Sb | 0,1 | 1 | 0,2 | 0,26 | 2 | 0,0*x* | 0,2 |
| 52 | Te | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,01 | | |
| 53 | I | 0,01 | 0,5 | 0,3 | 0,4 | 1 | 1,7 | 1,2 |
| 55 | Cs | 0,1 | 1 | | 0,5 | 12 | 0,*x* | 0,*x* |
| 56 | Ba | 1 | 300 | 650 | 830 | 800 | *x*0 | 10 |
| 57 | La | | 27 | | 60 | 40 | 30 | *x* |
| 72 | Hf | 0,1 | 1 | 1 | 1 | 6 | 3,9 | 0,3 |
| 73 | Ta | 0,018 | 0,48 | 0,7 | 3,5 | 3,5 | 0,0*x* | 0,0*x* |
| 74 | W | 0,1 | 1 | 1 | 1,5 | 2 | 1,5 | 0,6 |
| 78 | Pt | 0,2 | 0,1 | | | | | |
| 79 | Au | 0,005 | 0,004 | | 0,0045 | 0,001 | 0,00*x* | 0,00*x* |
| 80 | Hg | 0,01 | 0,09 | | 0,08 | 0,4 | 0,03 | 0,04 |
| 81 | Ti | 0,01 | 0,2 | 0,5 | 1,5 | 1 | 0,82 | 0,0*x* |
| 82 | Pb | 0,1 | 8 | 15 | 20 | 20 | 7 | 9 |
| 83 | Bi | 0,001 | 0,007 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | | |
| 90 | Th | 0,005 | 3 | 7 | 18 | 11 | 1,7 | 1,7 |
| 92 | U | 0,003 | 0,5 | 1,8 | 3,5 | 3,2 | 0,45 | 2,2 |

T et W données de TUREKIAN et WEDEPOHL (1961).
T données de VINOGRADOV (1962).

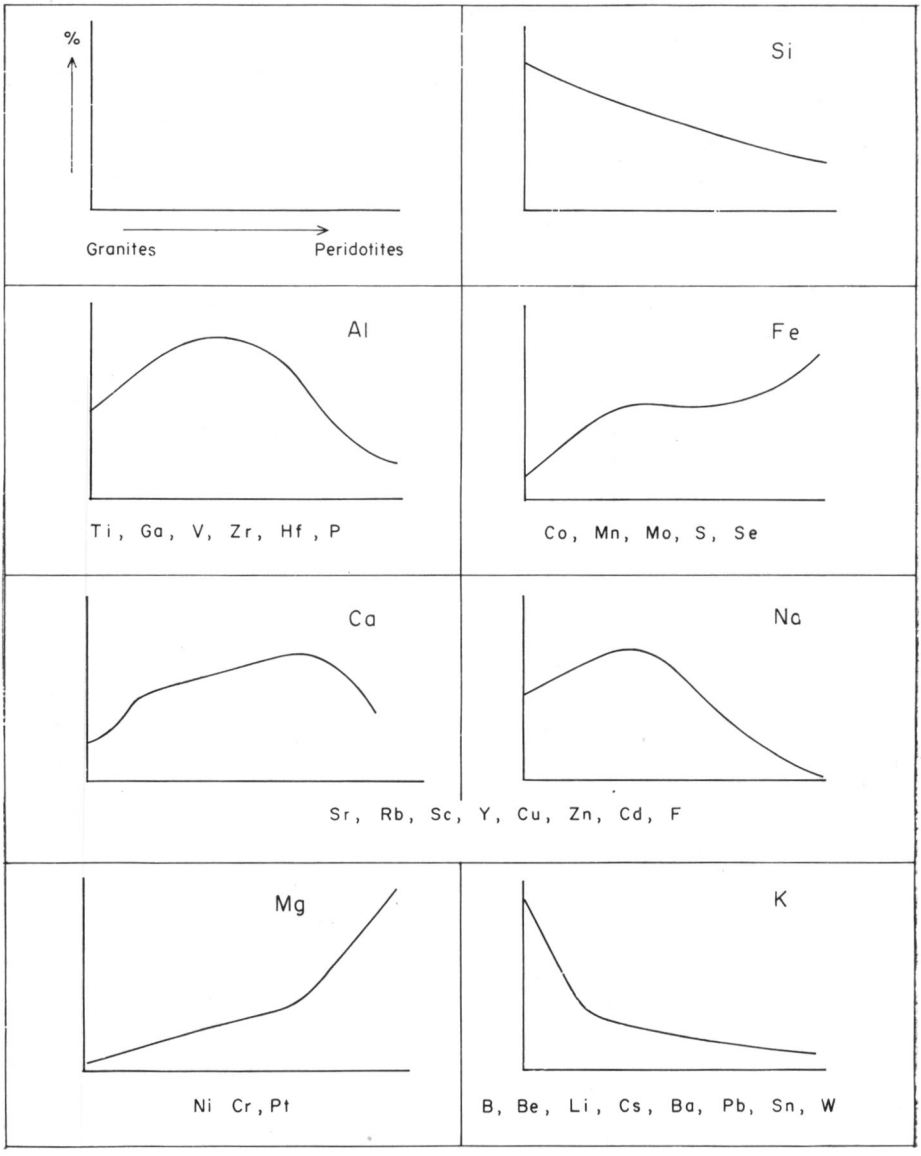



FIG. 1. — *Distribution des éléments dans les diverses catégories de roches éruptives* (LAPADU-HARGUES, 1968)

La répartition des éléments-traces semble donc bien liée à la *composition du magma*, chaque oligo-élément pouvant être d'ailleurs associé à un élément majeur caractéristique (fig. 1).

b) *Cas des roches sédimentaires détritiques.*

Il s'agit de roches mises en place par sédimentation après érosion, transport et triage : sables, grès, quartzites, sédiments fluvioglaciaires, argiles et schistes argileux... Dans ce cas, la teneur en éléments-traces paraît dépendre essentiellement de la proportion relative des minéraux primaires et des minéraux secondaires (argiles et hydroxydes) dans le matériau.

A ce point de vue, on peut alors distinguer 2 catégories :

1. Les roches détritiques contenant principalement des matériaux primaires résistants. Elles sont généralement pauvres en éléments-traces ; ceci découle, soit de la nature des minéraux constitutifs (quartz : sables, grès, quartzites...), soit de leur mode de genèse ou de leur mise en place (sédiments glaciaires, genre tillites, fracturés, broyés et abondamment « lavés »).

2. Les roches détritiques constituées plus particulièrement de minéraux secondaires (argiles, schistes...) ; elles sont mieux pourvues, car un certain nombre d'éléments-traces libérés au cours de la décomposition des édifices altérables sont immédiatement réincorporés dans le réseau des constituants secondaires (cf. chapitre suivant).

2. *Rôle de la province géographique.*

A la surface du Globe, il existe un certain nombre de régions où les roches silicatées ont une teneur plus élevée que la teneur moyenne correspondant à leur type pétrographique vis-à-vis d'un ou de plusieurs éléments-traces et inversement d'autres contrées, où c'est exactement le contraire. En d'autres termes, cela revient à dire que les diverses régions du globe peuvent présenter une certaine *originalité* sur le plan de la composition chimique ; cette originalité se traduit en général par l'individualisation de gîtes minéraux bien caractéristiques ; d'où le nom de *provinces métallogéniques*, qui leur avait été donné par LAUNAY (1913).

Exemples :

| Teneur plus élevée/moyenne | Région |
|---|---|
| Cr, Pt | Oural (Roches basiques) |
| Cu | Bouclier de l'Afrique centrale (Copper Belt) |
| Sn | Andes boliviennes |

3. *Rôle de la période de mise en place.*

C'est RANKAMA (1946) qui a montré le premier que la composition chimique des roches de *même* type pétrographique et appartenant à une *même* province, pouvait être différente ; ainsi en Fennoscandie, les granites précambriens sont par exemple enrichis en Li, Be, Rb, Cs, Ba, Ta, Pb... par rapport aux granites mis en place postérieurement.

Un tel résultat peut être transposé aisément à la France (PEDRO *et al.*, 1968), si l'on se base par exemple sur les travaux réalisés dans le Massif armoricain GRAINDOR, 1959-1961 ; COPPENET, 1956-1967 ; DUVAL, 1963-1967).

— En effet, les granites de la Bretagne occidentale et méridionale, qui appartiennent surtout à l'orogenèse hercynienne (fig. 2) sont généralement pauvres en cuivre, leur teneur moyenne étant de 4,8 p.p.m. (1-14) (COPPENET, 1956).

— En revanche, les granites du nord-est du Massif armoricain (Bocage normand, Bas-Maine) (granites intrusifs de Vire, Fougères, Athis...) ont été mis en place au cours de l'orogenèse cadomienne et sont donc d'âge précambrien (fig. 2) ; or, ils sont, d'après COPPENET (1967) et DUVAL (1967), mieux pourvus en cuivre ; leur teneur moyenne est de l'ordre de 20 p.p.m. (9 à 26).

Il existe donc une relation incontestable entre l'époque de la granitisation et l'intensité de la minéralisation.

***

Ainsi, à partir de données relatives au type pétrographique, à la localisation géographique et, dans une certaine mesure, à l'âge géologique du substratum, on peut déjà recueillir un certain nombre d'informations générales concernant la teneur en éléments-traces de tel ou tel matériau. C'est là, déjà, un apport très substantiel ; toutefois, il faut envisager maintenant un autre aspect du problème, celui qui a trait à l'état et à la disposition de ces éléments au sein même des roches.

### B. — *Localisation et disposition des éléments-traces dans les roches*

#### 1. *Principes fondamentaux. Caractéristiques chimiques des ions.*

Dans les édifices minéraux constituant un substratum donné, les éléments-traces se trouvent généralement à l'état d'*ions*, c'est-à-dire de particules chargées dont la configuration électronique est bien définie ; à ce sujet, on peut distinguer plusieurs ensembles et sous-ensembles d'éléments (tabl. 3) :

TABLEAU 3

*Classification des ions d'après leur configuration électronique*

| Configuration électronique | | Charge | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Sans électrons *d* | Ion type He (2 électrons périphériques) | $Li^+$ | $Be^{2+}$ | $B^{3+}$ | $(C^{4+})$ |
| Éléments lithophiles ou oxyphiles | Ion type gaz rare (8 électrons périphériques) | $Na^+$<br>$K^+$<br>$Rb^+$<br>$Cs^+$ | $Mg^{2+}$<br>$Ca^{2+}$<br>$Sr^{2+}$<br>$Ba^{2+}$ | $Al^{3+}$<br>$Sc^{3+}$<br>$Y^{3+}$<br>$La^{3+}$ | $(Si^{4+})$<br>$Ti^{4+}$<br>$Zr^{4+}$ |
| A électrons *d* | Ion à 18 électrons périphériques ou (18 + 2 él. pér.) (sous-couche *d saturée*) | *Cu*$^+$<br>$Ag^+$<br>*Au*$^+$ | *Zn*$^{2+}$<br>$Cd^{2+}$<br>$Hg^{2+}$<br>$Sn^{2+}$<br>$Pb^{2+}$ | $Ga^{3+}$<br>*In*$^{3+}$<br>$Sb^{3+}$<br>$Bi^{3+}$ | $Ge^{4+}$<br>$Sn^{4+}$<br>*Pb*$^{4+}$ |
| Éléments sulfophiles | Ion de transition (sous-couche *d incomplète*) | | *Fe*$^{2+}$<br>*Co*$^{2+}$<br>*Mn*$^{2+}$<br>*Ni*$^{2+}$<br>*Cu*$^{2+}$ | $Cr^{3+}$<br>*Fe*$^{3+}$<br>*Mn*$^{3+}$<br>$V^{3+}$<br>*Mo*$^{3+}$ | |

— Dans le premier ensemble, les ions ont une structure de *gaz rare*, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas de sous-couche *d* ou que la sous-couche *d* est vide ; de ce fait, ils participent essentiellement à des liaisons de type ionique.

Il s'agit des éléments que GOLDSCHMIDT (1954) a appelés *lithophiles*, RANKAMA (1950) *oxyphiles* et TAUSON (1954) *silicatés* (Li, Be, Sc, Ti...), parce qu'ils sont à la base de la constitution des minéraux essentiels de l'écorce terrestre.

— Dans le second ensemble, les ions possèdent tous des électrons *d* ; ce sont alors, soit des cations lourds à sous-couche *d* complète (18 ou 18 + 2 électrons périphériques), soit des ions de transition à sous-couche *d* non saturée. RANKAMA (1950) les a désignés sous le nom d'éléments *sulfophiles*, car ils ont une affinité plus grande pour le soufre que pour les réseaux à carcasse oxygénée et aussi du fait qu'ils participent à des liaisons plus covalentes (Cu, Zn, Mo, Pb...). Dans de telles conditions, ces éléments ne font généralement pas partie de la constitution des minéraux essentiels et ont été dénommés *extrasilicatés* par TAUSON (1954). Ils peuvent être présents dans les roches, soit sous la forme de composés indépendants, qui représentent les minéraux accessoires (sulfures, apatite...), soit être fixés à l'interface ou dans les fissures des constituants essentiels, c'est-à-dire en dehors du réseau cristallin.

Cette classification géochimique des ions va nous servir maintenant de guide dans l'étude de la localisation des éléments-traces ; de ce fait nous envisagerons successivement :

— le problème des éléments-traces *appartenant au réseau* des minéraux essentiels des roches ;

— puis, celui des éléments-traces situés *hors du réseau* des constituants fondamentaux.

2. *Les éléments-traces appartenant aux réseaux des constituants essentiels. Règles du camouflage* (GOLDSCHMIDT, 1937, 1945, 1954).

Le phénomène qui semble régler la distribution des éléments-traces au sein des minéraux essentiels a été désigné par GOLDSCHMIDT sous le nom de *diadochie*. Il traduit simplement la possibilité qu'a un ion quelconque d'être remplacé, dans un minéral donné, par un ion de *même taille* (1), sans que cela entraîne une modification notable du réseau cristallin, donc du type minéralogique. Aussi, un certain nombre d'éléments majeurs pourront-ils subir des substitutions isomorphiques de la part d'éléments-traces de dimension analogue, au sein des minéraux courants ; de ce fait, ils seront *camouflés* (suivant l'expression de GOLDSCHMIDT).

Par exemple, la formule classique d'un feldspath plagioclase ne faisant appel qu'aux éléments majeurs s'écrit :

$$(Si_{3-x}\ Al_{1+x})\ O_8\ Na_{1-x}\ Ca_x$$

avec $x = 0$ (Albite) et $x = 1$ (Anorthite).

(1) Si la charge est identique, cela ne pose aucun problème. Si la charge est différente, la substitution est encore possible ; mais, pour que l'équilibre électrique soit maintenu, il est nécessaire qu'une deuxième substitution se fasse dans le réseau, simultanément et en sens inverse.

# CARTE STRUCTURALE DU MASSIF ARMORICAIN

(Carte établie d'après les données de M. J. GRAINDOR-1961)

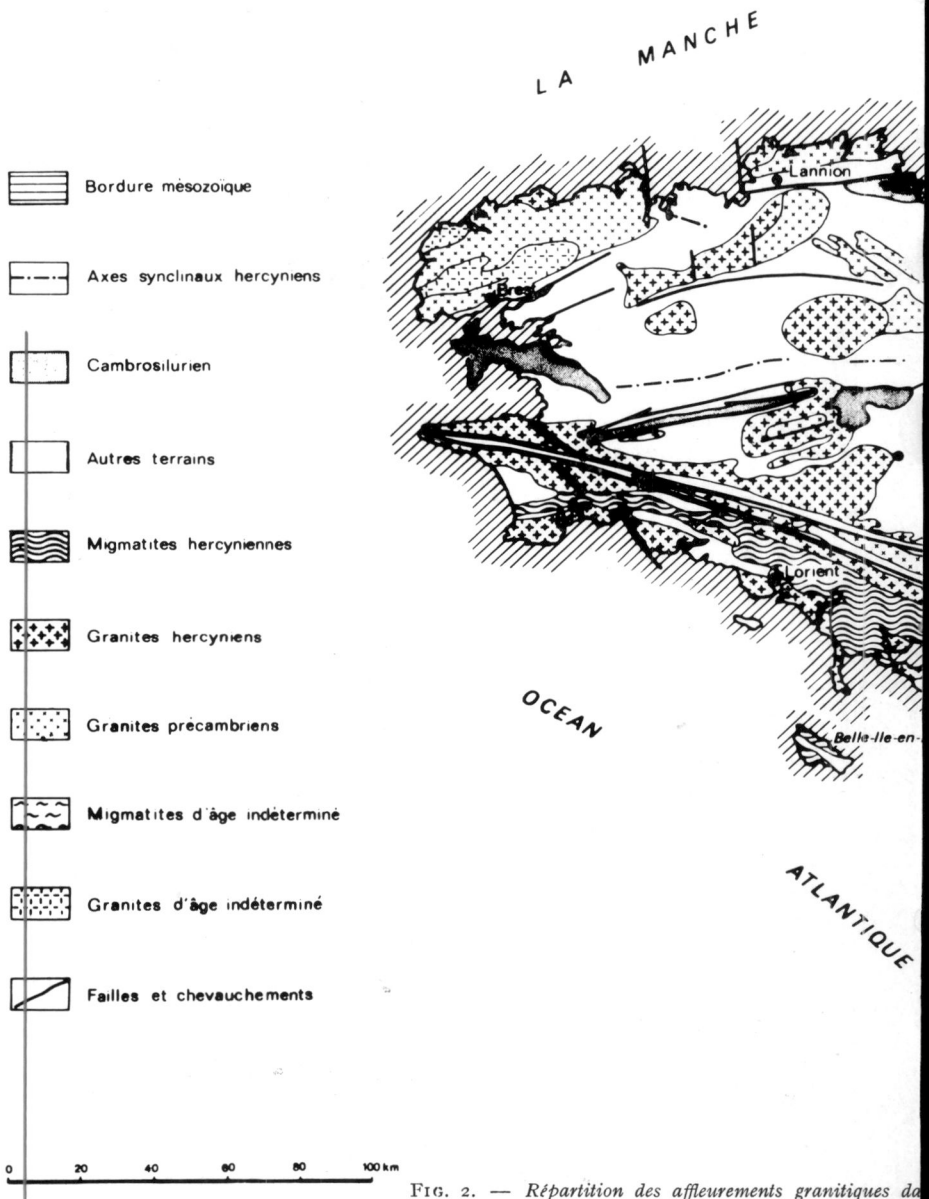
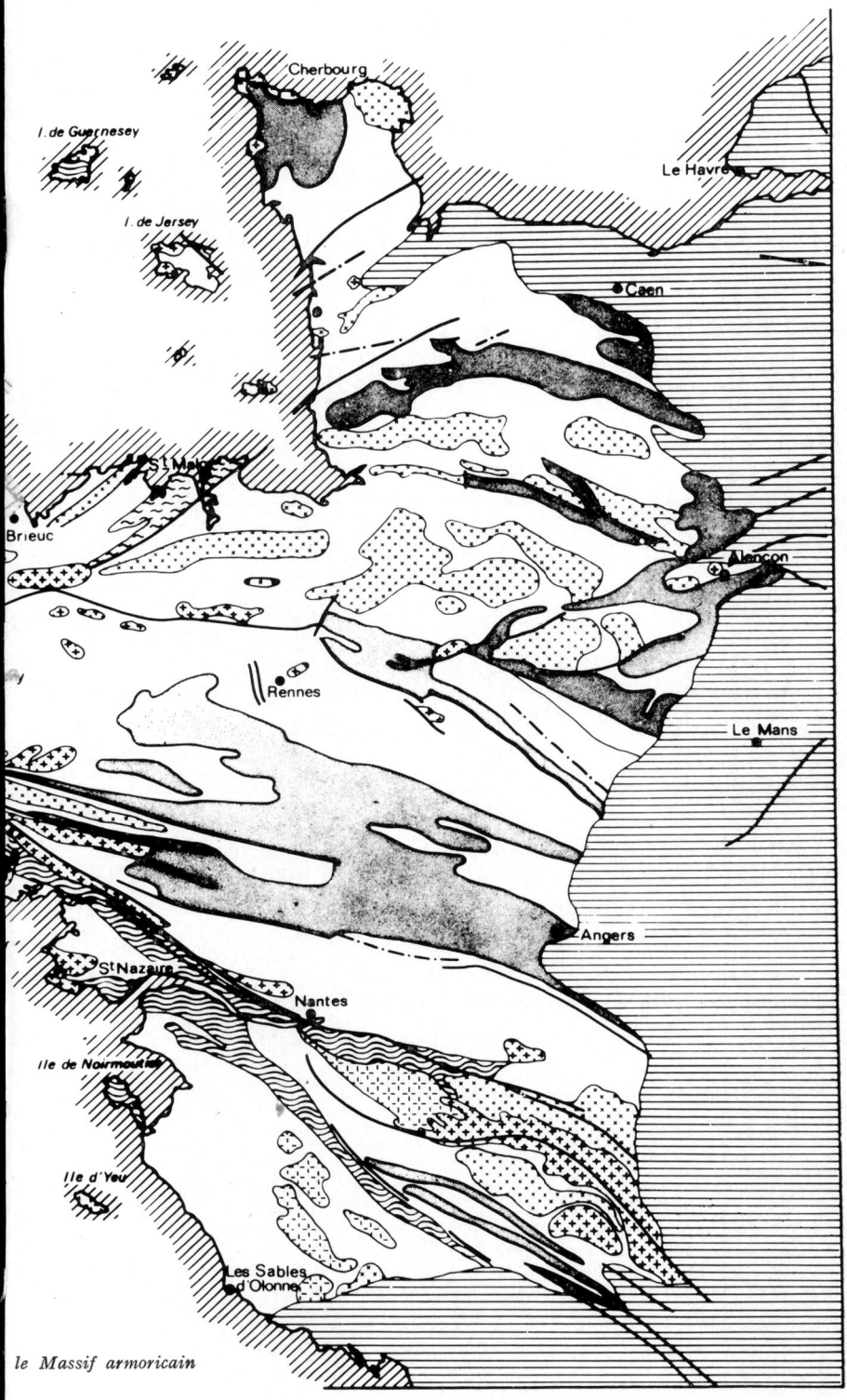



FIG. 2. — *Répartition des affleurements granitiques da*




*le Massif armoricain*

Mais la formule réelle doit s'écrire :

$$(Si\ Ge...)_{3-x}\ (Al\ Ga...)_{1+x}\ O_8\ (Na\ K\ Rb...)_{1-x}(Ca\ Sr\ Ba...)_x$$

Ge, Ga, Rb, Sr... étant respectivement camouflés par Si, Al, Na et Ca.

La caractéristique fondamentale concernant le problème du camouflage est donc bien le *rayon ionique*. A ce sujet, les éléments se répartissent en différents groupes ainsi qu'il est indiqué dans le tableau 4. Il faut ajouter toutefois que la sub-

TABLEAU 4

*Groupement des éléments suivant leurs rayons ioniques* (d'après SHAW, 1964)

| Rayons ioniques (Å) | Éléments |
|---|---|
| 0,1-0,3 | $B^{3+}$, $C^{4+}$, $N^{5+}$, $S^{6+}$ |
| 0,3-0,5 | $Be^{2+}$, $Si^{4+}$, $Ge^{4+}$, $P^{5+}$, $V^{5+}$, $Mo^{6+}$, $W^{6+}$ |
| 0,5-0,7 | $Al^{3+}$, $Ga^{3+}$, $Fe^{3+}$, $Cr^{3+}$, $V^{3+}$, $T^{4+}$, $Nb^{5+}$, $Ta^{5+}$ |
| 0,7-0,9 | $Li^{+}$, $Mg^{2+}$, $Mn^{2+}$, $Ni^{2+}$, $Co^{2+}$, $Fe^{2+}$, $Zn^{2+}$, $Sc^{3+}$ $In^{3+}$, $Zr^{4+}$, $Hf^{4+}$, $Sn^{4+}$ |
| 0,9-1,1 | $Na^{+}$, $Ca^{2+}$, $Cd^{2+}$, $Y^{3+}$, $Ce^{4+}$, $Th^{4+}$, $U^{4+}$ |
| 1,1-1,4 | $K^{+}$, $Sr^{2+}$, $La^{3+}$ |
| 1,4-1,7 | $Rb^{+}$, $Cs^{+}$, $Ba^{2+}$ |

stitution n'est possible que si la différence dans la valeur des rayons ioniques est au maximum de 15 p. 100 ; d'où les tolérances admises pour les principaux types de coordinence rencontrés dans les édifices cristallins (tabl. 5) (1).

TABLEAU 5

*Rayons ioniques et tolérance de substitutions* (d'après SHAW, 1964)

| Coordinence | Tolérance de rayons (Å) | Rayon moyen (Å) | Cations majeurs |
|---|---|---|---|
| 4 | 0,34-0,46 | 0,40 | $Si^{4+}$ ($Al^{3+}$) |
| 6 | 0,56-0,85 | 0,70 | $Al^{3+}$, $Fe^{3\ et\ 2+}$, $Mg^{2+}$ |
| 8 | 0,85-1,15 | 1,00 | $Na^{+}$, $Ca^{2+}$ |
| 8-12 | 1,19-1,61 | 1,40 | $K^{+}$ |

(1) Sur les autres causes de limitation, cf. SHERBINA (1969).

Finalement, les diverses possibilités de camouflage réalisées en application des règles de GOLDSCHMIDT sont sous forme synthétique dans le tableau 6.

Suivant cette conception, les éléments-traces sont partie intégrante du réseau des minéraux essentiels, où ils sont d'ailleurs *disséminés* dans tout l'édifice cristallin.

TABLEAU 6

*Types de substitutions diadochiques*

| Éléments majeurs | Éléments camouflés | |
|---|---|---|
| | Charge identique | Charge différente |
| $K^+$ | $Rb^+$ $Cs^+$ | $Ba^{2+}$ $Sr^{2+}$ $Pb^{2+}$ |
| $Na^+$ | | $Ca^{2+}$ |
| $Ca^{2+}$ | $Sr^{2+}$ $Mn^{2+}$ | $Na^+$ |
| $Mg^{2+}$ | $Fe^{2+}$ $Mn^{2+}$ $Co^{2+}$ $Ni^{2+}$ $Zn^{2+}$ | $Li^+$ $Al^{3+}$ $Fe^{3+}$ $Cr^{3+}$ $V^{3+}$ |
| $Al^{3+}$ | $B^{3+}$ $Ga^{3+}$ $Mn^{3+}$ $Cr^{3+}$ $Fe^{3+}$ $V^{3+}$ | $Si^{4+}$ |
| $Si^{4+}$ | $Ge^{4+}$ $Ti^{4+}$ | $Al^{3+}$ |
| $P^{5+}$ | $V^{5+}$ $As^{5+}$ | $Si^{4+}$ |
| $OH^-$ | $F^-$ | $O^{2-}$ |

3. *Les éléments-traces situés hors des réseaux.*

Le camouflage permet de comprendre et d'expliquer un ensemble de données relatives à la répartition des éléments-traces dans les roches. Mais, si l'on examine la composition en oligo-éléments de quelques minéraux essentiels (tabl. 7), on constate que la présence de certains éléments ne peut s'expliquer par l'intermédiaire des règles de GOLDSCHMIDT, basées essentiellement sur les substitutions isomorphiques. Il y a donc autre chose qui peut intervenir dans leur distribution. La mise au point récemment de microsondes électroniques avec dispositif à balayage automatique a permis d'apporter de nouveaux faits sur cette question.

Actuellement, en dehors de la diadochie, la présence d'éléments-traces dans les roches peut être expliquée de 2 façons :

a) *Les éléments-traces sont autonomes*, c'est-à-dire qu'ils entrent dans la composition de minéraux indépendants tels la pyrite $FeS_2$, le zircon $ZrSiO_4$, l'apatite $(PO_4)_3Ca_5(F, OH)$, la tourmaline (1), la barytine $BaSO_4$. Ceux-ci, qui sont en général des constituants *accessoires* des roches, sont alors localisés, soit entre les cristaux, soit à l'intérieur (inclusions) des minéraux essentiels.

b) *Les éléments sont liés à la présence des constituants habituels*, non pas dans le réseau, mais *à la surface des réseaux* où ils sont retenus sous forme adsorbée ; ils peuvent de ce fait être fixés, soit extérieurement, c'est-à-dire aux interfaces des cristaux, soit dans les discontinuités physiques au sein des microfissures... C'est ce que GONI (1966) a désigné sous le nom d'éléments *fissuraux*.

Exemples : Cu, Cr, V, Zn... dans les biotites.
Co, Ni... dans certaines antigorites.

(1) Borosilicate de formule complexe (cf. MAURICE, 1966).

TABLEAU 7

*Composition des minéraux essentiels* (d'après WEDEPOHL, 1967)

| Minéral | *x* % | 0,*x* % | 0,0*x* % | 0,00*x* % | 0,000*x* % |
|---|---|---|---|---|---|
| Plagioclase ..... | K | Sr | Ba, Rb, Ti, Mn | P, Ga, V, Zn, Ni | Pb, Cu, Li, Cr, Co, B |
| Feldspath K ..... | Na | Ca, Ba, Sr | Rb, Ti | P, Pb, Li, Ga, Mn | B, Zn, V, Cr, Ni, Co |
| Quartz ..... | | | | Al, Ti, Fe, Mg, Ca | Na, Ga, Li, Ni, B, Zn, Ge Mn |
| Amphibole ..... | | Ti, F, K, Mn, Cl, Rb | Zn, Cr, V, Sr, Ni | Ba, Cu, P, Co, Ga, Pb | Li, B |
| Pyroxène ..... | Al | Ti, Na, Mn, K | Cr, V, Ni, Cl, Sr | P, Cu, Co, Zn, Li, Rb | Ba, Pb, Ga, B |
| Biotite ..... | Ti, F | Ca, Na, Ba, Mn, Rb | Cl, Zn, V, Cr, Li, Ni | Cu, Sr, Co, P, Pb, Ga | B |
| Olivine ..... | | Ni, Mn | Ca, Al, Cr, Ti, P, Co | Zn, V, Cu, Sc | Rb, B, Ge, Sr, As, Ga, Pb |

Mais les recherches dans cette voie n'étant pas très poussées, il est difficile encore aujourd'hui de dégager quelques règles générales qui permettent de se repérer aisément dans ce domaine.

4. *Conclusions.*

La localisation des éléments-traces dans les roches peut se faire en définitive de différentes manières, ainsi que cela est récapitulé dans le tableau 8. Or, un tel résultat n'est pas sans avoir de conséquences sur le plan de l'aptitude à la libération et à la mobilisation des éléments.

— C'est ainsi que les éléments camouflés qui sont *disséminés* dans les réseaux silicatés ne pourront être libérés qu'au fur et à mesure de la dislocation du réseau ; leur extraction ne semble devoir se faire que progressivement.

— En revanche les éléments plus *localisés*, soit autonomes, soit fissuraux se trouvant à des discontinuités, peuvent être atteints, dès les premières phases de l'évolution, par les solutions d'altération, ainsi que cela a été montré expérimentalement par GONI (1966).

C'est d'ailleurs ce problème d'extraction et de mise en solution des éléments-traces au cours de la pédogenèse, qui va être abordé maintenant et faire l'objet de la deuxième partie.

TABLEAU 8

*État et localisation des éléments-traces dans les roches*

| Localisation minéralogique | Types d'éléments-traces | Origine de répartition | Localisation générale | Minéraux caractéristiques |
|---|---|---|---|---|
| Dans le réseau des constituants essentiels | É. camouflés | Diadochie | Dissémination dans le réseau | Minéraux essentiels |
| Hors du réseau des constituants essentiels | É. fissuraux | Adsorption | Concentration à la surface et dans les microfissures internes | |
| | É. autonomes | Individualisation propre | Concentration localisée (extracristalline ou inclusions) | Minéraux accessoires |

## II. — LA RÉPARTITION DES ÉLÉMENTS-TRACES AU COURS DES PHÉNOMÈNES PÉDOLOGIQUES

Au cours de l'évolution dans le milieu superficiel, on sait que les minéraux et les roches de l'écorce terrestre sont soumis à des phénomènes de décomposition chimique et que, de ce fait, les éléments entrant dans leur constitution sont progressivement *libérés*. Or, dès que cette libération est réalisée, il est normal d'imaginer

que les divers éléments auront un comportement dynamique qui leur est propre, puisque celui-ci ne dépend théoriquement que de leur nature et des conditions du milieu ambiant. C'est donc en faisant appel à ces 2 sortes de caractéristiques, qu'il sera possible d'établir les principes généraux qui permettent de comprendre la distribution des divers éléments-traces dans les sols et les horizons d'altération.

## A. — *Principes généraux de la distribution des éléments-traces dans les sols*

La plupart des réactions mises en jeu dans les processus d'altération se produisent en *solutions aqueuses*. Aussi, pour analyser le comportement des divers éléments au cours des phénomènes pédologiques, il est indispensable de prendre en considération, non plus leurs caractéristiques cristallochimiques : rayons ioniques, coordinence... comme on l'a fait dans le chapitre précédent, mais leurs caractéristiques *physico-chimiques*, c'est-à-dire constante d'acidité, potentiel d'oxydo-réduction, produit de solubilité du composé dans lequel ils entrent, constante de stabilité des complexes éventuels... Ce sont celles-ci en effet, qui permettent de connaître *l'état* sous lequel se trouve un élément bien déterminé en fonction des conditions du milieu (pH — potentiel redox), et en même temps de préciser son *comportement dynamique* au cours de la pédogenèse.

### 1. *État des éléments en solution suivant les conditions du milieu.*

Indiquons en premier lieu que tout élément, étant à même de participer à des équilibres d'oxydo-réduction (échange d'électrons), peut conduire à des particules de charge différente, dont le domaine d'existence dépend à la fois du potentiel d'oxydo-réduction du système considéré ($M^{+} — M^{2+}$ ou $N^{0} — N^{+}$) et du potentiel d'oxydo-réduction du milieu. Il est donc nécessaire de connaître ces deux sortes de paramètres, si l'on veut avoir la possibilité de déterminer sous quel degré d'oxydation se trouve un élément dans un milieu donné et d'autre part, de prévoir les transformations électroniques éventuelles.

Mais ceci posé, chaque ion a en solution un comportement physico-chimique qui lui est propre et peut donc être considéré comme un élément particulier.

a) Or, on sait qu'en solution aqueuse, un ion suivant la définition de BRONSTEDT correspond à un couple acide-base :

$$Na^{+} + H_2O \longrightarrow Na\,OH + H^{+}$$
$$Al^{3+} + H_2O \longrightarrow (Al\,OH)^{2+} + H^{+}$$

dont la force est déterminée par la constante d'acidité :

$$K_A = \frac{[(MOH)^{(x-1)+}]\,[H^{+}]}{[M^{x+}]}$$

Le $pK_A = — \log K_A$ est donc la caractéristique physico-chimique essentielle qui conduit à classer les différents ions de la solution en fonction de leur force acido-basique et, en même temps, à déterminer l'*état* sous lequel se trouve un élément donné suivant le pH du milieu.

Les pK caractérisant les principaux éléments sont indiqués dans le tableau 9 et l'état des éléments en solution schématisé dans la figure 3.

Ainsi pour les éléments, soit très acides (pK < 0), soit très basiques (pK ⩾ 14), l'état sous lequel se trouve l'élément est identique quel que soit le pH.

Par contre, tous les autres éléments sont hydrolysés et peuvent se présenter sous 2 ou 3 états dans la gamme de pH 0 — 14 ; la connaissance du pK permet alors de savoir dans quelle zone de pH l'élément se trouve sous tel ou tel état et quelle est respectivement la largeur de chacun des domaines ; en effet :

— si pH < $pK_A$ : existence prépondérante de cation,
— si pH > $pK_A$ : existence de formes hydroxo et d'hydroxydes.

TABLEAU 9

*Constantes d'acidité des éléments en solution* ($pK_A$ *des ions*)
(d'après CHARLOT, 1963)

| Cations | Anions |
|---|---|
| | 58 C ($CH_4$) |
| | 35 N ($NH_3$) |
| 14,8 $K^+$-$Rb^+$-$Cs^+$ | |
| 14,7 $Na^+$ | |
| | 14 O ($OH_2$) |
| 13,8 $Li^+$ | |
| 13,2 $Ba^{2+}$-$Sr^{2+}$ | |
| 12,6 $Ca^{2+}$ | |
| 11,5 $Mg^{2+}$ | |
| 10,6 $Mn^{2+}$ | |
| 9,5 $Fe^{2+}$ | |
| 9,4 *Ni*$^{2+}$ | |
| 9,2 $NH^{4+}$ | |
| 8,9 *Co*$^{2+}$ | |
| 8,7 $Cd^{2+}$-*Cu*$^{2+}$ | |
| 8,4 $La^{3+}$ | |
| 7,6 *Zn*$^{2+}$ | |
| 7,0 $In^{3+}$ | 7,0 S ($SH_2$) |
| 5,8 $Sc^{3+}$ | |
| 5,0 $Al^{3+}$ | |
| 4,3 $Th^{4+}$ | |
| 3,9 $Sn^{2+}$ | |
| 3,8 $Cr^{3+}$ | 3,8 *Se* ($SeH_2$) |
| 3,2 $Be^{2+}$ | 3,2 F (FH) |
| 3,0 $Fe^{3+}$ | |
| 2,9 $V^{3+}$ $Ga^{3+}$ | |
| 2,7 $Hg^{2+}$ | |
| 2,0 $Ti^{4+}$ $U^{4+}$ | |
| 1,6 $Bi^{3+}$ | |
| — 1,2 $Zr^{4+}$ | |
| < — 1,2 $Si^{4+}$ | |
| *B*$^{3+}$ | — 7 Cl (ClH) |
| *Mo*$^{6+}$ | — 9 Br (BrH) |
| | — 10 *I* (IH) |

*b*) Mais toutes les solutions, et en particulier les solutions d'altération ne sont pas des solutions aqueuses pures ou assimilées (1) ; elles peuvent contenir en effet un certain nombre d'anions qui correspondent à des acides dont le pK est compris

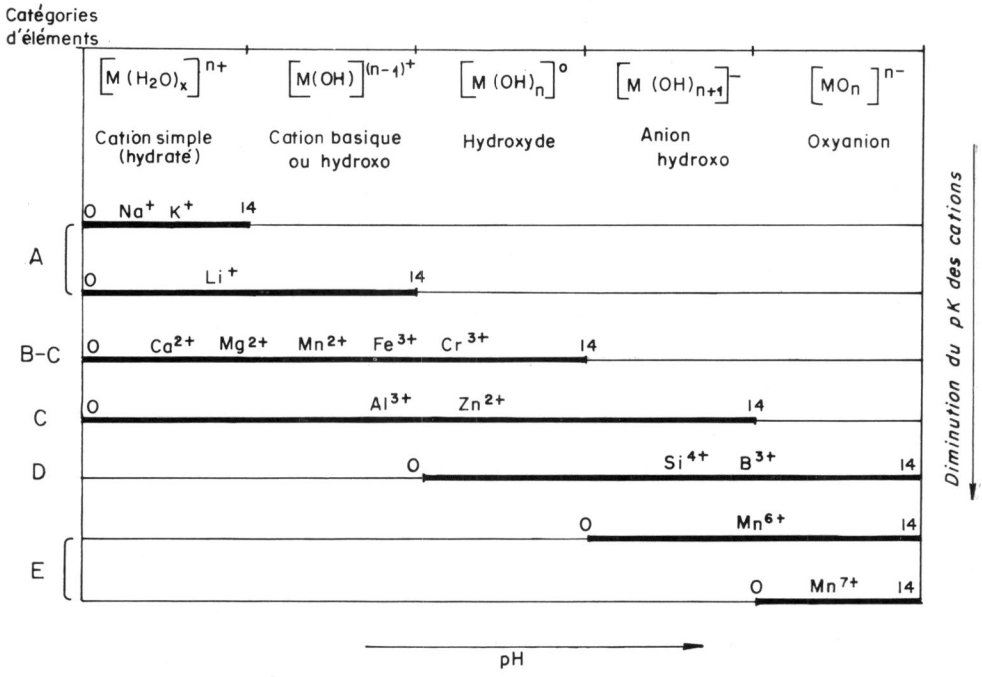



FIG. 3. — *États des éléments en solution suivant les conditions de milieu*

entre 0 et 14 et qui, de ce fait, ont tendance à interférer dans un certain domaine avec les ions $OH^-$ de l'eau et à modifier ainsi le schéma précédent.

α — Si l'on considère tout d'abord le cas des anions classiques *non complexants* : $CO_3^{2-}$, $S^{2-}$, l'étude physico-chimique montre que, pour un élément donné, 2 solutions se présentent :

— ou bien, pK élément < pK anion ; le schéma hydrolytique n'est alors pas modifié, car l'affinité de M pour OH est plus forte que celle de M pour l'anion,

— ou bien, pK élément > pK anion. Ici, dès qu'on se trouve dans un milieu où le pH est supérieur au pK de l'acide, c'est le *sel* qui a tendance à se former de préférence à l'hydroxyde (2). *L'acidolyse* prend alors le pas sur l'hydrolyse.

Exemple : Présence de $CO_2$ ($pK_1 = 6{,}4$) (fig. 4).

— Pour $Fe^{3+}$ ($pK_A = 3{,}0$), le schéma hydrolytique n'est pas modifié.

— En revanche, avec $Fe^{2+}$ ($pK_A = 9{,}5$), le schéma se présente ainsi qu'il est indiqué figure 4.

β — Si l'on s'adresse à des anions *complexants*, le problème ne se présente pas de la même façon ; en effet, il s'agit d'anions qui sont susceptibles de participer

(1) Cas des solutions contenant des *anions* qui correspondent à des acides très forts (pK < 0).
(2) Sauf en milieu très basique.

à des fortes liaisons M—L, de nature covalente et qui, de ce fait, prennent le pas sur les liaisons M—OH des composés hydroxylés habituels. Ainsi, sauf en milieu très basique (forte concentration en OH), l'anion « complexe » les éléments dès que le pH devient supérieur à sa constante d'acidité (fig. 5) ; la *complexolyse* constitue alors le processus fondamental de l'évolution physico-chimique en solution.

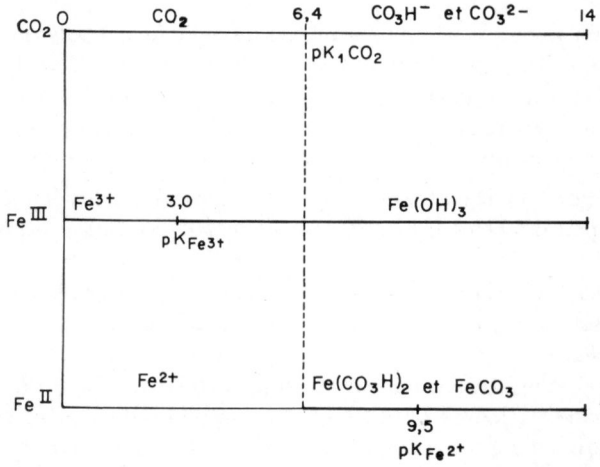



FIG. 4. — *Influence de la présence de $CO_2$ sur le comportement de Fe II et Fe III*

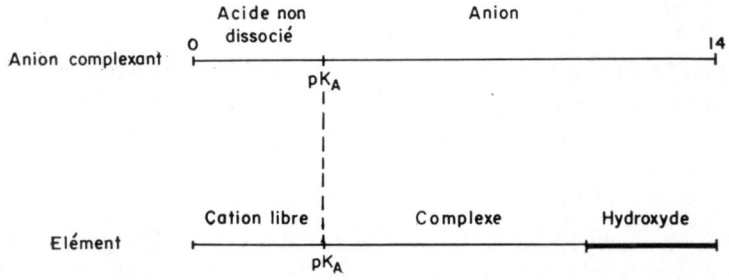



FIG. 5. — *Influence des complexants sur le comportement des éléments*

Naturellement, cette affinité d'un anion complexe pour les éléments dépend de sa nature ; elle est ainsi fixée pour un cation donné par la *constante de stabilité* $\beta$ :

$$M + nL = ML_n$$

$$\beta = \frac{[ML_n]}{[M]\,[L]^n}$$

Mais celle-ci est variable suivant les éléments considérés ; c'est ainsi qu'à la suite des travaux de SCHWARZENBACH, ARLAND et CHATT (cf. RINGBOOM, 1967), on sait par exemple que :

— les éléments lithophiles à structure de gaz rare (tabl. 3) sont peu complexés. Leur comportement ne sera donc pratiquement pas modifié par la présence de complexes en solution.

— les éléments sulfophiles sont nettement complexés en particulier les cations à sous-couche *d* saturée ($Cu^{+}$, $Zn^{2+}$, $Cd^{2+}$, $Hg^{2+}$...). La présence d'anions complexants changera dans ce cas radicalement le comportement de ces éléments.

*2. Considérations sur la mobilité des éléments en fonction des conditions physico-chimiques.*

Jusqu'alors, nous nous sommes intéressés à la forme sous laquelle un élément déterminé, se trouvait en solution pour des conditions physico-chimiques données ; mais, ce qui est encore plus important, *sous l'angle du comportement dynamique*, c'est de voir les répercussions qu'entraînent de telles considérations quant à la *mobilité* ou la *non mobilité* des éléments « libérés » dans le milieu superficiel.

Or, le comportement de tel ou tel élément dépend essentiellement de la *solubilité* des composés peu dissociés qui sont susceptibles de se former dans la gamme normale de pH.

— En effet, les ions libres sont par définition dispersés en solution, donc mobiles.

— Il en est de même des *complexes*, qui sont des composés non ionisés, mais toujours solubles.

— En revanche, des composés classiques, tels que les *hydroxydes* et les *sels*, peuvent être plus ou moins solubles et plus ou moins dissous suivant les éléments ; la caractéristique majeure devient alors le *produit de solubilité* du composé, c'est-à-dire :

$$K_c = [M^{n+}]\,[OH^-]^n$$
$$K_c = [M^{n+}]\,[A^-]^n$$

avec $pS = -\log K_c$.

*a*) Si l'on considère tout d'abord uniquement les composés hydroxo, type $M(OH)_n$, on peut, en se basant sur la valeur de leur produit de solubilité, classer les éléments en 5 catégories (tabl. 10 et 11).

— A. *Éléments à hydroxydes solubles* ($S > 1$ g/l), soit $pS < 5$.

Ce sont les éléments appartenant au groupe des alcalins et alcalino-terreux typiques ($Li^{+}$, $Na^{+}$, $K^{+}$, $Rb^{+}$, $Cs^{+}$, $Tl^{+}$, $Ca^{2+}$, $Sr^{2+}$, $Ba^{2+}$...), qui sont très *basiques* ($pK > 12{,}6$) et qui existent à l'état de *cations simples* dans toute ou presque toute la gamme de pH.

Si on se réfère au diagramme de GOLDSCHMIDT qui fait appel à la notion de potentiel ionique pour chaque élément : $\varnothing = \frac{z\ (\text{charge})}{r\ (\text{rayon ionique})}$, on constate (fig. 6), que les éléments de la catégorie A correspondent à un $\varnothing < 2$.

— B. *Éléments à hydroxydes peu solubles* ($S < 1$ g/l), soit $5 < pS < 20$.

Cette catégorie caractérise des éléments moins basiques ($7{,}6 < pK < 11{,}5$), appartenant en chimie analytique au groupe dit du zinc : $Mg^{2+}$, $Mn^{2+}$, $Ni^{2+}$, $Fe^{2+}$, $Co^{2+}$, $Zn^{2+}$, $Cd^{2+}$, $Cu^{2+}$, $Pb^{2+}$, $La^{3+}$... Dans la gamme habituelle de pH, ils peuvent alors exister, soit à l'état de cations (simples ou hydroxo), soit d'hydroxydes $M^n(OH)_n$. Si on utilise les conceptions de GOLDSCHMIDT, ils correspondent à des potentiels ioniques compris entre 2 et 3.

— C. *Éléments à hydroxydes très insolubles* (S < 1 mg/l), soit pS > 20.

Ces éléments constituent en chimie analytique le groupe de l'ammoniaque : $Be^{2+}$, $Hg^{2+}$, $Sc^{3+}$, $Cr^{3+}$, $Al^{3+}$, $Fe^{3+}$, $Ga^{3+}$, $Bi^{3+}$, $Ti^{4+}$, $Zr^{4+}$... Ils sont peu basiques ou même amphotères (— 1,2 < pK < 7), de telle sorte que c'est la phase hydroxyde $M_n(OH)_n$ qui est prédominante dans la zone classique de pH.

Du point de vue du potentiel ionique, cette catégorie se situe entre $\varnothing = 3$ et $\varnothing = 7$.

TABLEAU 10

*Produit de solubilité des hydroxydes et de quelques composés.*
(Données de CHARLOT, 1963 ; KRAUSKOPF, 1967 ; PERELMAN, 1967)

| Catégorie | Éléments | pS (1) Hydroxydes | pS Carbonates | pS Sulfures | pS composés divers | Catégorie | Éléments | pS Hydroxydes |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | $Be^{2+}$ | 20,8 |
| | | | | | | | $Ce^{3+}$ | 22,3 |
| | $Na^+$ | — 2,9 | | | | | $Hg^{2+}$ | 25,5 (HgO) |
| | $Cs^+$ | — 2,8 | | | | | $Sc^{3+}$ | 26,3 |
| | $K^+$ | — 2,6 | | | | | $Cr^{3+}$ | 30 |
| | $Li^+$ | — 1,4 | | | | | $Bi^{3+}$ | 30,4 |
| A | $Tl^+$ | 0,2 | | 20,3 | | C | $Al^{3+}$ | 32,5 |
| | $Ba^{2+}$ | 2,3 | 8,8 | — | 10,0 | | $In^{3+}$ | 33,2 |
| | $Sr^{2+}$ | 3,5 | 9,6 | — | ($BaSO_4$) | | $V^{3+}$ | 34,4 |
| | $Ca^{2+}$ | 5,3 | 8,4 | — | 4,5 | | $Ga^{3+}$ | 35 |
| | | | | | ($CaSO_4$) | | $Fe^{3+}$ | 38 |
| | | | | | | | $Ti^{4+}$ | 40 |
| | | | | | | | $Th^{4+}$ | 44,7 |
| | | | | | | | $Tl^{3+}$ | 45 |
| | $Ag^+$ | 7,6 ($Ag_2O$) | — | 49,2 | 9,8 | | $U^{4+}$ | 45 |
| | | | | | (AgCl) | | $Mn^{4+}$ | 56 |
| | $Mg^{2+}$ | 11,0 | 5,1 | — | | | $Sn^{4+}$ | 56 |
| | $Mn^{2+}$ | 12,7 | 10,2 | 12,6 | | | | |
| | $Cd^{2+}$ | 13,7 | 11,3 | 27,8 | | | | |
| | $Ni^{2+}$ | 14,7 | 6,9 | 25,4 | | | | |
| | $Co^{2+}$ | 14,8 | 12,8 | 20,4 | | | | |
| B | $Fe^{2+}$ | 15,1 | 10,5 | 17,2 | | | $V^{5+}$ | 14,7 ($V_2O_5$) |
| | $Pb^{2+}$ | 15,3 | 13,1 | 27,5 | | D | $Si^{4+}$ | 8 ($SiO_2$) |
| | $Zn^{2+}$ | 17,0 | 10,8 | 22 | | | $Ge^{4+}$ | 2,3 ($GeO_2$) |
| | $La^+$ | 19,0 | | 12,7 | | | | |
| | $Cu^{2+}$ | 19,7 | 9,3 | 36,1 | | | | |
| | | | | | | | $B^{3+}$ | |
| | | | | | | E | $As^{5+}$ | < 0 |
| | | | | | | | $P^{5+}$ | |

(1) dans le cas des hydroxydes, le pS correspond à l'hydroxyde vrai M (OH)n, sauf dans quelques cas indiqués où il s'agit de l'oxyde.

TABLEAU II

*Classification des éléments suivant leurs caractéristiques physico-chimiques*

| Catégories<br>Produit de solubilité Hydroxyde $M(OH)_n$ | | Caractère acidobasique des éléments | Potentiel ionique des éléments | Formes caractéristiques entre pH 0 — 14 | Principaux éléments | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Éléments majeurs | Éléments-traces |
| A | $pS < 5$ | $pK \geqslant 12{,}6$ | $\varnothing < 2$ | Cations simples | $K^+$, $Na^+$, $Ca^{2+}$ | $Rb^+$, $Cs^+$, $Li^+$, $Tl^+$, $Ba^{2+}$, $Sr^{2+}$,... |
| B | $5 < pS < 20$ | $7{,}6 < pK < 11{,}5$ | $2 < \varnothing < 3$ | Cations-hydroxydes | $Mg^{2+}$, $(Fe^{2+})$ | $Ni^{2+}$, $Cu^{2+}$, $Zn^{2+}$, $Co^{2+}$, $Mn^{2+}$ $La^{3+}$ |
| C | $pS > 20$ | $1{,}2 < pK < 7$ | $3 < \varnothing < 7$ | Hydroxydes | $Al^{3+}$, $Fe^{3+}$ | $Be^{2+}$, $Ga^{3+}$, $Cr^{3+}$, $Ti^{4+}$, $Mn^{4+}$, $Zr^{4+}$,... |
| D | $pS < 20$ | $pK \leqslant -1{,}2$ | $7 < \varnothing < 11$ | Hydroxyacides Anions condensés | $Si^{4+}$ | $B^{3+}$, $Ge^{4+}$, $V^{5+}$, $Mo^{6+}$ |
| E | $pS$ petit ou négatif | | $\varnothing > 11$ | Anions classiques | $N^{3+}$ | $P^{5+}$, $Se^{6+}$, $I^{7+}$,... |

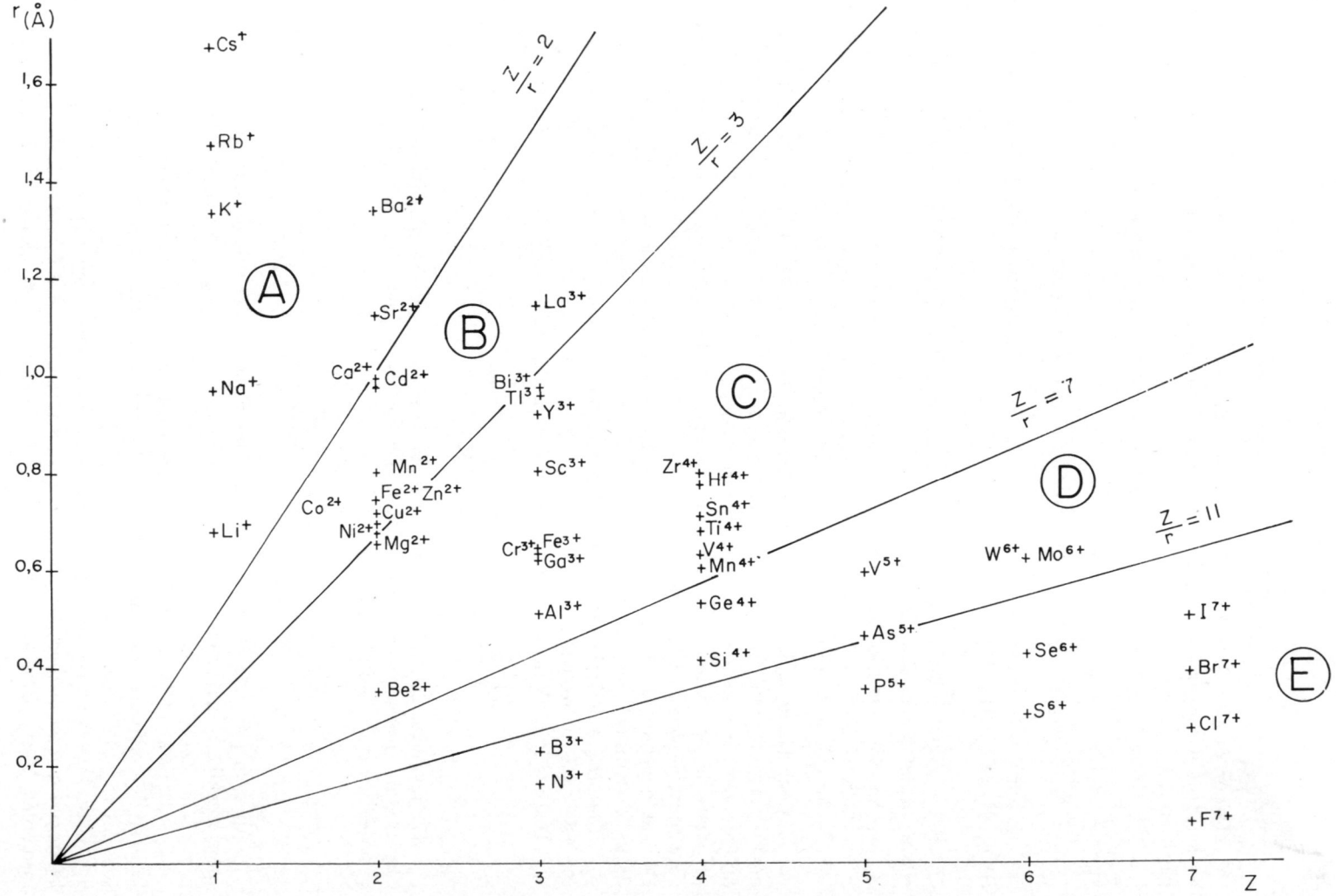



FIG. 6. — *Classification des éléments en fonction de leur potentiel chimique*

— D. *Éléments à hydroxyacides condensés et peu solubles.*

Il s'agit de $Si^{6+}$, $Ge^{6+}$, $Mo^{6+}$, $W^{4+}$... qui sont déjà des cations acides (pK $< -1{,}2$) en sorte qu'ils apparaîssent, soit sous forme d'hydroxyacides, soit d'anions entre pH 0 et 14.

Ces éléments correspondent sensiblement à un potentiel ionique compris entre 7 et 11.

— E. *Éléments à hydroxyacides simples et très solubles* ($\varnothing > 11$).

Ils sont à la base des acides minéraux classiques : $ClO_3(OH)$, $NO_2(OH)$, $SO_2(OH)_2$, $SeO_2(OH)_2$, $CO(OH)_2$, $PO(OH)_3$, $AsO(OH)_3$.

Si l'on applique ces données aux problèmes de mobilité des éléments en présence d'eau, on est amené à constater que :

— les éléments des catégories A et E seront très mobiles ;
— les éléments de la catégorie B et aussi D seront moins mobiles ;
— les éléments de la catégorie C seront immobiles.

*b*) Considérons maintenant le cas où, en plus des ions $OH^-$ de l'eau, interviennent d'autres types d'anions. Le problème du comportement dynamique se présente différemment. On peut envisager 2 éventualités :

Dans la première, les anions sont susceptibles de donner des sels précipités dans toute la zone de pH où ceux-ci peuvent intervenir. La mobilité théorique d'un élément dépendra alors de la valeur respective des produits de solubilité de l'hydroxyde et du sel considéré.

Elle sera améliorée lorsque le sel formé sera plus soluble que l'hydroxyde (pS sel < pS hydroxyde).

D'après le tableau 10, c'est le cas du groupe du zinc *en milieu carbonique* :

$$\begin{cases} -pS\ CO_3Zn = 10{,}8 \\ -pS\ Zn(OH)_2 = 17 \end{cases}$$

En revanche, la mobilité sera diminuée lorsque le sel sera plus insoluble que l'hydroxyde (p S sel > p S hydroxyde) c'est ce qui se passe par exemple pour le groupe du zinc *en milieu sulfhydrique* :

$$\begin{cases} -pS\ ZnS = 22 \\ -pS\ Zn(OH)_2 = 17 \end{cases}$$

Ainsi, la présence de $CO_2$ favorisera la mobilisation des éléments du groupe B (pour des pH > 6,4), alors que celle d'$H_2S$ les freinera (lorsque le pH est supérieur à 7).

— Dans la 2e éventualité, on a affaire à des réactifs complexants, qui sont à la base de composés peu ionisés *toujours très solubles*. Ainsi, la mobilité est dans tous les cas améliorée.

C'est donc là un fait qui intéresse non seulement les éléments dont les composés hydroxo sont peu solubles (catégories B et D), mais surtout les éléments à hydroxydes insolubles, c'est-à-dire les éléments C. Les cations à charge élevée et les cations

lourds sont d'ailleurs les éléments qui sont les plus sensibles à la complexation (cf. ci-dessus).

Quant à la largeur du domaine où le complexe est en compétition avec l'hydroxyde, elle dépend du rapport $\frac{K_c}{S}$ $K_c$ étant la constante de stabilité du complexe et S la solubilité de l'hydroxyde ; c'est ainsi que plus $K_c$ est grand ou S petit et plus la zone de complexation, donc de mobilisation éventuelle, sera large.

*Conclusions.*

A la lueur des données qui viennent d'être exposées ci-dessus, la situation concernant la mobilité théorique des éléments « libérés », en dehors de la zone où ils existent à l'état de cations ($pH < pK_A$) se présente ainsi qu'il est indiqué sous forme récapitulative dans le tableau 12.

TABLEAU 12

*Comportement des éléments suivant les conditions du milieu*

| Catégories | Mobilité hydrolytique | Influence du $CO_2$ | Influence d'un milieu sulfhydrique | Influence des complexants |
|---|---|---|---|---|
| A | très forte | ○ | ○ | + |
| B | faible | + | — | ++ |
| C | nulle | ○ | ○ | +++ |
| D | faible | ○ | ○ | |
| E | très forte | ○ | ○ | |

○ pratiquement sans influence
\+ influence positive (mobilité accrue)
— influence négative (mobilité diminuée)

## B. — *Applications aux phénomènes pédologiques.*

### 1. *Cadre général.*

Dans le milieu naturel, l'agent courant de l'altération des minéraux et des roches de surface est constitué par de l'eau pluviale relativement pure. Cependant, avant d'atteindre le substratum minéral de la lithosphère, celle-ci traverse l'atmosphère, puis la zone superficielle d'accumulation des résidus végétaux ; elle se charge ainsi en divers constituants. De ce fait, la nature de la solution d'attaque dépend à la fois de la composition de l'atmosphère et des réactions biochimiques qui prennent naissance au sein de la litière et qui engendrent divers composés organiques plus ou moins stables et plus ou moins solubles. Ce dernier point est d'ailleurs important à considérer, car sur le plan de l'agressivité, seuls les composés directement solubles (liquides ou gazeux) présentent un certain intérêt.

A ce niveau, on peut distinguer 2 grands types de milieux d'altération à la surface du globe (dans les conditions les plus générales, c'est-à-dire dans les stations à drainage librement assuré) :

— soit, en effet, on a affaire à une solution aqueuse simplement enrichie en $CO_2$. C'est ce qui se passe dans tous les cas, puisque l'atmosphère contient normalement du gaz carbonique ($10^{-4}$M). Notons toutefois que la concentration en $CO_2$ est en général encore plus élevée puisqu'il s'y ajoute le gaz qui provient de la minéralisation de la matière organique (teneur de l'atmosphère 0,1 à plus de 1 p. 100 d'après RUSSEL, 1961), surtout dans les climats chauds et humides où la destruction de la litière végétale est brutale et rapide.

On peut dire, dans ces conditions, que la solution d'altération est constituée par de l'eau *plus ou moins enrichie en* $CO_2$ ;

— soit, on se trouve en milieu froid et humide de telle sorte que la dégradation biochimique de la litière est lente et conduit essentiellement à la production de composés organiques légers, hydrosolubles, tels les acides carboxyliques ou phénoliques (DUCHAUFOUR, 1957 ; LOSSAINT, 1959 ; JACQUIN et BRUCKERT, 1965-1966).

La solution d'altération est dans ce cas une eau caractérisée par la présence d'agents *complexants* et même *chélatants*.

Ce sont ces deux cas qui sont à considérer plus spécialement sur le plan de la dynamique générale des éléments et en particulier des éléments-traces au cours de la pédogenèse.

a) *Action de l'eau plus ou moins chargée en* $CO_2$.

En présence d'eau *pure*, seuls interviennent dans la décomposition des minéraux, les ions $H^+$ et $OH^-$. Il s'agit donc essentiellement d'un phénomène *d'hydrolyse*, c'est-à-dire d'un phénomène au cours duquel tous les éléments libérés apparaissent, soit à l'état d'ions simples ou hydroxo, soit à l'état d'hydroxydes.

D'une façon générale, les éléments peuvent être, après extraction des réseaux,

— ou bien éliminés au fur et à mesure (classes A et E),
— ou bien éliminés plus lentement (classes B et D),
— ou bien accumulés sur place (classe C).

— Or, les premier et dernier cas ne présentent pas de modifications fondamentales lorsque les caractéristiques climatiques changent.

— En revanche, dans le 2e cas, l'élimination des éléments des classes B et D se fait d'autant plus nettement que les climats sont plus agressifs, c'est-à-dire que l'hydrolyse est plus totale :

Ainsi, l'hydrolyse est généralement faible dans les zones tempérées typiques ou arides, de telle sorte que l'élimination de $SiO_2$ et MgO par exemple se fait lentement. Il y a alors genèse éluviale d'argiles 2/1 type montmorillonite, ce qui correspond à la *bisiallitisation* (PÉDRO, 1966).

La décomposition devient notable dans les zones tropicales et conduit à l'élimination partielle de $SiO_2$, mais quasi totale des éléments B. Cela correspond à l'édification d'argiles 1/1 type kaolinite (*monosiallitisation*).

Enfin, l'hydrolyse peut-être totale dans les zones tropicales et équatoriales très humides, où seuls les éléments C peuvent se maintenir dans les niveaux en en voie d'altération. Il y a alors accumulation d'hydroxydes métalliques et en

particulier d'hydroxydes d'aluminium comme dans les latérites et bauxites ; c'est l'*allitisation*.

En quoi la présence de $CO_2$ dans les eaux d'altération influe-t-elle sur les phénomènes tels qu'ils viennent d'être présentés ? Le pK de $CO_2$ étant de 6,4, la situation est la suivante :

— Pour tous les éléments dont $pK_M > pK_{CO_2}$, l'affinité M—$CO_2$ est supérieure à l'affinité M—OH ; le transport, qui se fait alors sous forme de *sel* (et non d'hydroxyde), est favorisé comme on l'a vu lorsque la solubilité est supérieure à celle de l'hydroxyde ; c'est ce qui se produit pour les éléments de la catégorie B.

— A l'opposé, pour les éléments dont $pK_M < pK_{CO_2}$, $CO_2$ n'a aucune action, le processus restant essentiellement de nature hydrolytique.

En conclusion, en ce qui concerne les phénomènes de décomposition mis en jeu par de l'eau plus ou moins chargée en $CO_2$ et qu'on désigne sous le nom général de phénomènes de *soluviation* (SWINDALE et JACKSON, 1956), la situation sur le plan de la dynamique des éléments et en particulier des éléments-traces s'établit de la façon suivante (tabl. 13) :

1° les éléments des catégories A et E sont aisément éliminés au fur et à mesure de leur extraction ;

2° les éléments appartenant aux catégories B et D sont évacués lentement, mais l'exportation est d'autant plus favorisée que l'hydrolyse est plus intense, c'est-à-dire que les conditions climatiques sont plus agressives, et que les solutions sont plus chargées en $CO_2$ ;

3° les éléments du groupe C se maintiennent sur place dans toutes les situations.

b) *Action de l'eau chargée en acides organiques complexants.*

Les agents complexants de la solution d'altération prennent alors le pas sur tous les autres composés, de telle sorte que le processus mis en jeu est une simple

TABLEAU 13

*Comportement des diverses catégories d'éléments suivant les types d'altération*

| Agents d'altération | Processus d'altération | | Catégorie A (alcalins) | Catégorie B (Mg) | Catégorie C (Al, Fe) | Catégorie D (Si) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Eaux chargées en $CO_2$ | Soluviation (Hydrolyse) | Bisiallitisation | Élimination assez forte | Élimination modérée | Accumulation | Élimination faible |
| | | Monosiallitisation | Élimination totale | Élimination totale | | Élimination modérée |
| | | Allitisation | | | | Élimination totale |
| Eaux chargées en ions organiques complexants | Cheluviation-Podzolisation | | Élimination totale | Élimination totale | Élimination totale | Élimination modérée |

complexolyse. C'est la *chéluviation* de SWINDALE et JACKSON (1956), qui correspond en fait à la *podzolisation* des pédologues.

D'après ce qui a été indiqué plus haut, non seulement dans ce cas l'élimination des cations lourds de la catégorie B est accélérée, mais encore les éléments du groupe C peuvent être exportés avec les eaux de drainage.

Ainsi, la présence d'agents organiques dans les solutions d'altération est à même de provoquer l'élimination plus ou moins rapide et plus ou moins complète de *tous* les éléments-traces existant à l'origine dans la roche du substratum (tabl. 13).

2. *Présentation sommaire des résultats obtenus au cours d'études géochimiques récentes sur les phénomènes d'altération superficielle.*

A notre époque, les recherches concernant le comportement géochimique des éléments-traces au cours de la pédogenèse commencent à voir le jour ; citons par exemple les travaux de WRIGHT *et al.* (1955), KOVDA *et al.* (1958), SWAINE et MITCHELL (1960), PINTA et OLLAT (1961), OBUKHOV (1968), NALOVIC et PINTA (1969), RAMBAUD (1969)... Toutefois, une seule étude d'ensemble a été tentée jusqu'alors sur cette question ; il s'agit du travail de TARDY (1969) qui porte sur l'évolution géochimique engendrée à la surface du globe sous les différents climats, à l'exclusion de la zone boréale podzolisante (domaine de la podzolisation zonale, PÉDRO, 1968). C'est donc à cette étude que nous nous référerons principalement pour étayer les quelques données théoriques qui ont été exposées ci-dessus.

a) *Composition des niveaux éluviaux caractérisant les grands types d'altération.*

La figure 7 représente, à titre d'exemple et sous la forme graphique imaginée par TARDY, la variation de la teneur en éléments-majeurs et en un certain nombre d'éléments-traces (Ba, Sr, V, Ni, Co, Cr, B, Zn, Ga, Cu et Pb) de quelques formations superficielles parmi les plus typiques :

— un niveau de *latérite bauxitique*, Chaillu (Congo, Brazzaville) ;

— un horizon d'*argile tachetée à kaolinite*, sol ferrallitique de Korhogo (Côte-d'Ivoire), moyenne de 17 échantillons ;

— un *vertisol* lithomorphe à montmorillonite développé sur diorite (Cameroun) ; auxquelles on a ajouté :

— une *carapace calcaire* en provenance de Largeau (Tchad). Notons que dans la présentation adoptée, les cations sont portés en abscisse dans un ordre correspondant sensiblement aux catégories A, B, C et D ; en ordonnée, sont indiquées les teneurs correspondant à la teneur réelle divisée par le clarke de chaque élément (RANKAMA et SAHAMA, 1950). (Le clarke du bore, qui est de 3 p.p.m. a été compté à 30 p.p.m. pour ramener les points à une échelle comparable aux autres éléments.)

Cette figure montre ainsi nettement que :

— l'accumulation de Al, Ga, Ti, Cr, V, Fe et B (*grosso modo* les éléments C) se fait dans tous les niveaux résiduels ; elle est particulièrement nette dans les formations kaolinitiques et bauxitiques ;

— le maintien des éléments de la catégorie B (Pb, Cu, Mn, Co, Ni, Zn) et des alcalino-terreux est incontestable dans les sols correspondant à la bisiallitisation (vertisol).

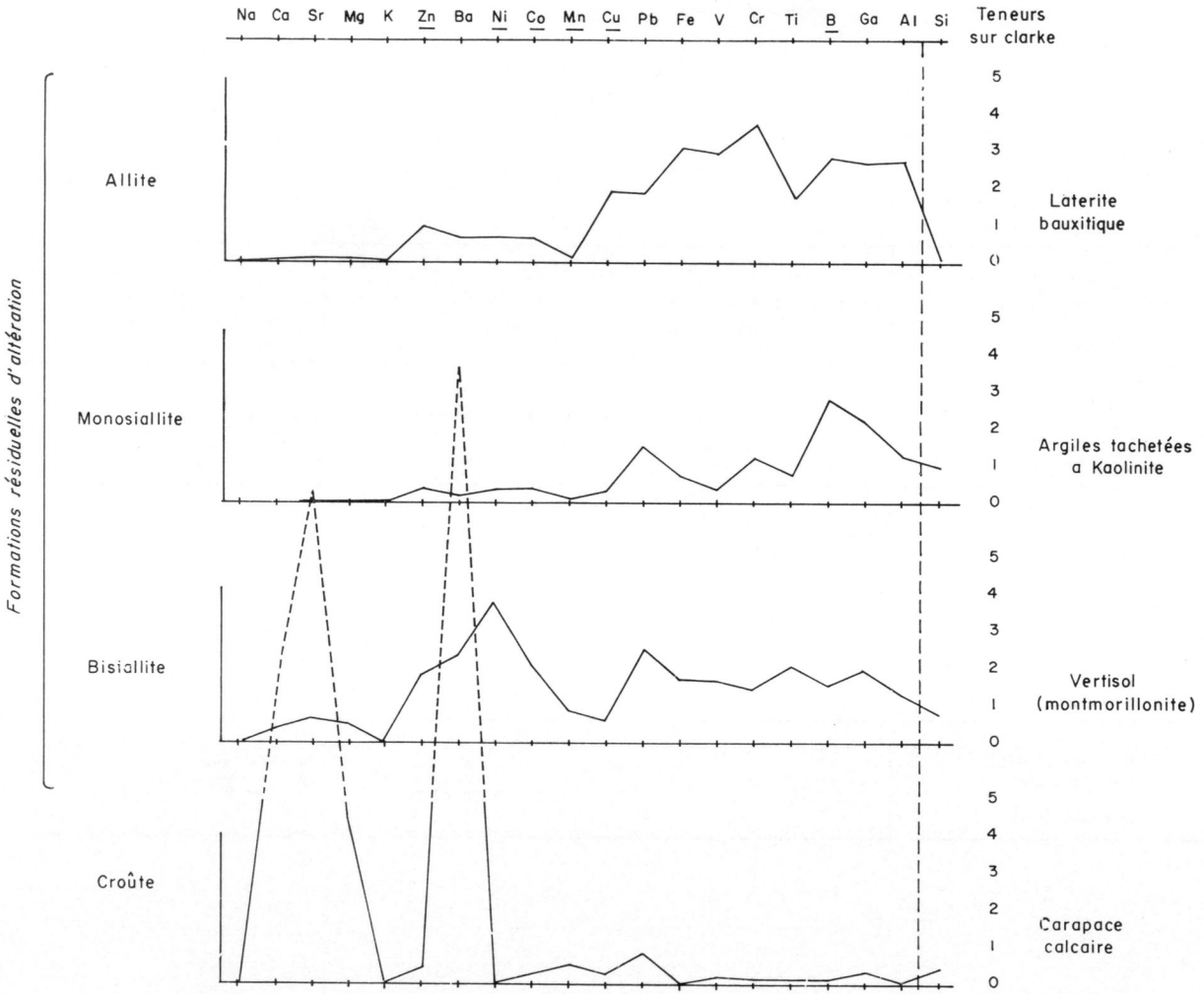



FIG. 7. — *Composition de quelques formations superficielles caractéristiques* (Y. TARDY, 1969)

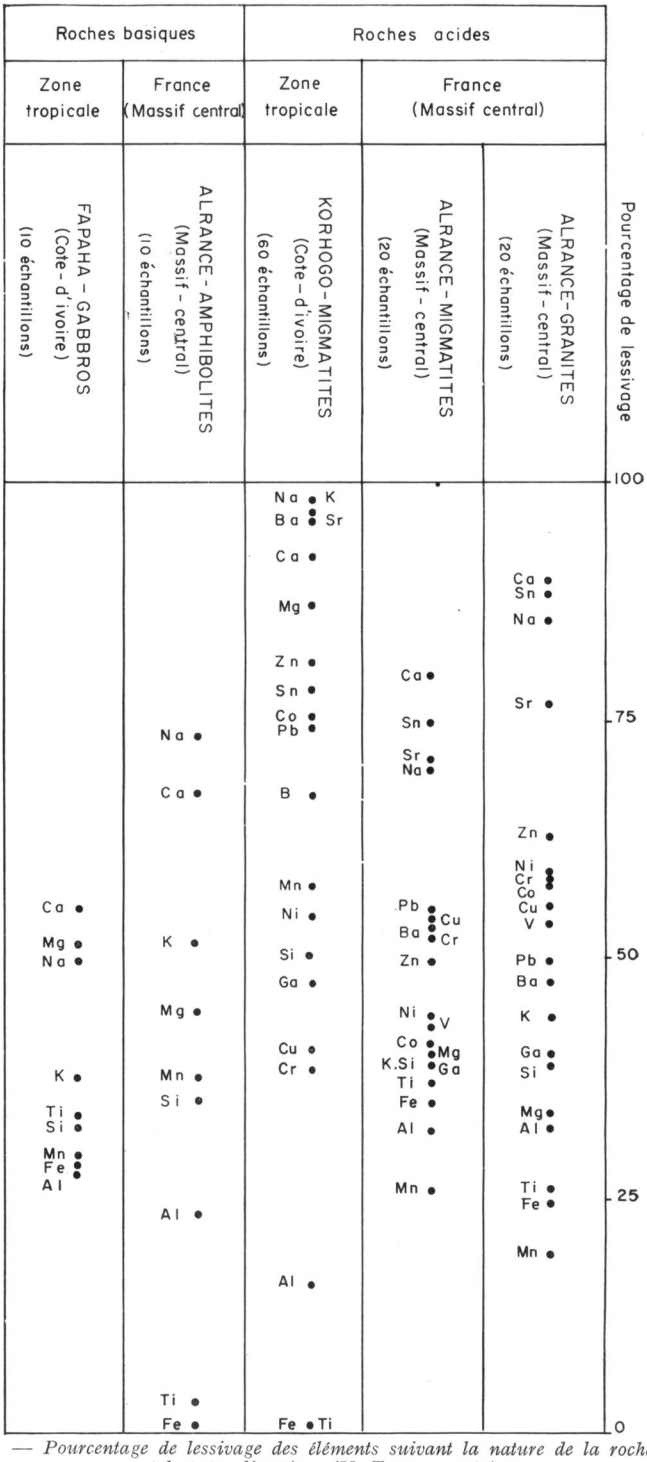



FIG. 8. — *Pourcentage de lessivage des éléments suivant la nature de la roche mère et le type climatique* (Y. TARDY, 1969)

De plus, on constate que les alcalino-terreux : Ca, Sr, Ba (catégorie A) sont les seuls à s'accumuler dans les formations calcaires résultant de la concentration des solutions d'évaporites en milieux arides.

b) *Évaluation des vitesses de lessivage des divers éléments. Détermination pratique de l'ordre de lessivage.*

TARDY (1969) a pu, d'un autre côté, en partant de divers niveaux d'altération pour lesquels le volume de la roche de départ était conservé, déterminer grâce au raisonnement isovolumétrique le pourcentage moyen de lessivage de chaque élément et avoir ainsi une idée de la vitesse de départ d'un certain nombre d'éléments au cours de la décomposition. Le pourcentage de lessivage d'un élément $i$ est donné en effet par la relation :

$$\frac{Pi - P'i}{Pi\,(d - d')}$$

$Pi$ et $P'i$ étant les poids de l'élément $i$ dans un volume fixe de roche saine et de niveau altéré et $d$ et $d'$ les densités respectives des 2 formations.

Les résultats obtenus sur roches acides ou basiques et sous des climats tempéré (Massif Central) ou tropical humide (Côte d'Ivoire) ont, après avoir été amenés à une variation de densité correspondant à *une unité*, été représentés sous la forme graphique rapportée dans la figure 8.

Pour une altération de nature essentiellement hydrolytique, l'ordre de lessivage se présente en général de la façon suivante :

— Na, Ca, Sr, As, sont toujours très bien éliminés ;

— K, Mg et Ba viennent ensuite ;

— Zn, Co, Ni, Cu, Pb et $SiO_2$ se situent au milieu de l'échelle ;

— Fe, Al, Ti, V, Cr et Ga sont assez peu évacués, c'est-à-dire qu'on trouve sensiblement la succession : éléments A et E, puis B et D, enfin C.

Certes, l'examen attentif des résultats de terrain montre aussi que, pour un certain nombre d'éléments, il y a quelque peu divergence entre les données théoriques et les valeurs mesurées par TARDY (1969). Mais, à première vue, ceci paraît assez normal dans la mesure où il s'agit d'évaluations obtenues à partir d'un trop petit nombre d'études. C'est ainsi que les divergences notées ici peuvent ne pas apparaître dans des recherches effectuées en d'autres régions (OBUKHOV, 1968 ; NALOVIC et PINTA, 1969) et inversement d'ailleurs. Dans ces conditions, il semble donc bien qu'il soit encore nécessaire d'attendre le moment où l'on pourra disposer de données de terrain suffisamment nombreuses, pour pouvoir confronter efficacement les résultats du milieu naturel avec les indications théoriques.

## CONCLUSIONS

En utilisant les données géochimiques relatives aux roches et aux phénomènes pédologiques, nous sommes parvenus à énoncer quelques grandes règles qui président à la distribution générale des oligo-éléments dans les sols et les formations superficielles. Ce sont donc elles qui actuellement conduisent à déterminer les tendances géochi-

miques fondamentales pouvant se manifester dans les conditions de la surface du globe.

Mais, étant donné une roche mère et un type d'évolution pédologique, les principes indiqués ne permettent pas cependant de préciser la *situation* concernant les éléments-traces dans un sol déterminé à un instant donné. En effet, deux sortes de facteurs interviennent à ce niveau, qui ne peuvent se traduire par des règles strictes :

— Il s'agit, d'une part, de *l'état* sous lequel se trouve un élément dans la roche de départ ; or, cet état joue un rôle important dans la mobilité « effective » de l'élément considéré. C'est ainsi que la vitesse d'élimination du sodium sera nettement différente pour une même teneur initiale suivant qu'à l'origine on a affaire à de l'albite $NaAlSi_3O_8$ (minéral résistant) ou de la thermonatrite $Na_2CO_3$, $H_2O$ (espèce soluble) ; il en est de même, de celle du cuivre, qui pourra être variable suivant que Cu sera adsorbé à l'interface de minéraux essentiels ou à l'état de constituants autonomes (type chalcopyrite $CuFeS_2$) ou encore dans le réseau des biotites.

— Le deuxième aspect concerne *l'âge* des sols. Pour un matériau originel donné et un type d'évolution déterminé, il est évident que plus le sol sera vieux, plus il sera appauvri, par exemple en éléments de catégories A, B, D et E. L'âge constitue donc un facteur non négligeable, qui devient d'ailleurs prépondérant dans les sols âgés.

En conclusion, cette étude montre ainsi que si l'on base les investigations à la fois sur la constitution chimique et minéralogique détaillée de la roche mère, sur le type pédogénétique en cours d'évolution et enfin sur l'état de développement du profil, on pourra déjà se faire une assez bonne idée de la situation concernant les différents problèmes qui ont trait aux oligo-éléments dans les sols.

*Reçu pour publication en juin 1970.*

## SUMMARY

GEOCHEMICAL PRINCIPLES OF THE DISTRIBUTION OF TRACE ELEMENTS IN SOILS

The trace-elements content of soils depends on the one hand on the nature of the parent rock and the minerals it contains and on the other hand on the type of modification it has undergone.

It depends in fact on the petrographic type, in the case of crystalline rocks (felsitic minerals in acidic rocks and mafic minerals in basic materials), and on the age of these formations. In the case of sedimentary rocks, based on detrital, it depends on the relative proportions of primary minerals and of secondary constituents.

The localization of these trace-elements may vary. They may be dispersed within the silicate lattices of the main mineral constituents (camouflage elements), when their existence is related to the substitution phenomenon defined by GOLDSCHMIDT (diadoche) in which one ion can replace another in a lattice if their ion rays are similar and if balanced-hoad requirements are met.Or in other cases they may be constituents of accessory minerals (autonomous elements) or elements absorbed in microfissures and at the interfaces of the main minerals (fissural elements).

During the development of a soil as effected by reactions in aqueous solution (hydrolysis, acidolysis, complexolysis), each element is « liberated » more or less quickly according to its localization and the case with which the mineral containing it can be modified. It then reacts according to its own physico-chemical properties, viz : pK (which defines its existence in the form of simple ions or of hydroxylated or salt-formed or finally of complexed ions) and rh. (which determines its oxydation rate in relation to environmental facteurs). The solubility of each of these forms enables its mobility to be evaluated.

The comparison of these mobilities in hydrolytic conditions, in the presence of $CO_2$, or in a complexing medium, leads to their classification into the five main categories A, B, C, D and E (elements with soluble, poorly-soluble, or very-insoluble hydroxides ; elements with condensed and poorly-soluble hydroxyacids ; and elements with simple and very soluble hydroxyacids).

Thus, the behaviour of every trace-element after extraction can be compared with that of the class to which it belongs.

At the surface of the earth, where environmental conditions are defined mainly by the soil-formation process (as has been shown by experiment), similar behaviour is found. This has also been confirmed by recent studies of soils from very different places and of very different types.

## ZUSAMMENFASSUNG


### DIE GEOCHEMISCHEN GRUNDSÄTZE DER VERTEILUNG DER SPURENELEMENTE IN DEN BÖDEN

Der Gehalt an Spurenelementen der Böden hängt einerseits von der Beschaffenheit des Muttergesteins und der darin enthaltenen Mineralien ab, anderseits von der Art der Veränderungen, die es erleidet.

Im Falle der Kristallgesteine (felsiphile Elemente der sauren Gesteine oder femaphile Elemente der basischen Materialien) hängt der Gehalt in der Tat vom petrographischen Typus und von dem Alter dieser Bodenbildungen ab. Im Falle der aus Trümmern gebildeten Ablagerungsgesteine ist der Gehalt von dem relativen Anteil der primären Mineralien und der sekundären Bestandteilen abhängig.

Die Lokalisierung dieser Spurenelemente kann veränderlich sein :

Sie können im Innern von silikathaltigen Netzen der wesentlichen Mineralien (getarnte Elemente) verteilt sein ; ihre Existenz ist dann von dem durch GOLDSCHMIDT definierten Substitutionsphänomen (diadochie) abhängig, da ein Ion imstande ist, ein anderes in einem Netze zu ersetzen, vorausgesetzt, dass ihre ionischen Strahlen benachbart sind und das Gleichgewicht der Ladungen eingehalten wird.

In anderen Fällen handelt es sich um Bestandteile von zweirangigen Mineralien (autonome Elemente) oder um Elemente, die in den Mikrospalten und auf der Zwischenfläche der wesentlichen Mineralien (gespalteten Elemente) adsorbiert wurden.

Im Laufe der pedologischen Evolution, die durch Reaktionen in wasserhaltigen Lösungen (Hydrolyse, Säurelösung, Komplexolyse) charakterisiert ist, wird jedes Element mehr oder weniger rasch « befreit », je nach seiner Lokalisierung und der Degradierung des betreffenden Minerals. Es reagiert dann in Abhängigkeit der eigenen physiko-chemischen Daten : pK (das seine Existenz in Form von einfachen, hydroxylierten, salzhaltigen oder komplexierten Ionen definiert) und rh (das seinen Oxydationsgrad in Abhängigkeit von den Milieubedingungen bestimmt). Die Löslichkeit jeder dieser Formen erlaubt ihren Beweglichkeitsgrad vorauszusehen.

Der Vergleich dieser Beweglichkeiten unter hydrolytischen Bedingungen, in Gegenwart von $CO_2$, oder im komplexierenden Milieu, erlaubt dieselben nach fünf grossen Kategorien : A, B, C, D und E zu klassifizieren (Elemente mit löslichen, wenig löslichen, stark unlöslichen Hydroxyden, Elemente mit verdichteten, wenig löslichen Hydroxysäuren, Elemente mit einfachen und gut löslichen Hydroxysäuren).

So kann das Verhalten jedes Spurenelementes nach seiner Extraktion, mit jenem der Klasse, welcher es angehört, verglichen werden.

Auf der Oberfläche der Erdkugel, wo die Milieubedingungen hauptsächlich durch den pedogenetischen Prozess bedingt sind, wie das durch Versuche gezeigt wurde, findet man ein ähnliches Verhalten. Dies wurde neuerdings auch durch Untersuchungen, die auf Böden sehr verschiedenen geographischen Ursprungs und Beschaffenheit durchgeführt wurden, bestätigt.

## РЕЗЮМЕ

*Геохимические принципы распределения микроелементов в почвах.*

Г. ПЕДРО, А. Б. ДЕЛЬМАС.

Содержание микроелементов в почве зависит прежде всего от природы материнской породы и минералов ее составляющих, а также от типа выветривания, которому эта порода подвержена.

Оно действительно зависит от петрографического типа в случае кристаллических пород (фельсифильные элементы кислых, или фемафильные элементы щелочных пород) и от возраста этих образований. Что-же касается осадочных обломочных пород, здесь существует зависимость от относительной пропорции, как первичных минералов так и вторичных компонентов.

Локализация микроелементов может быть разной :

Они могут быть рассеяны внутри силикатных сетей основных минералов (скрытые элементы); их существование тогда связанно с феноменом замещения, которому дал определение Гольдщмидт (диадохия), когда один ион может заместить другой, если их ионные лучи близки и заряд сохраняет равновесное состояние. В иных случаях они являются составными второстепенных минералов (самостоятельные элементы) или элементов адсорбированных в микро-трещинах, или во внутренних поверхностях (интерфас) микро-трещин основных минералов.

В течении почвообразовательной эволюции характеризующейся реакциями в почвенных растворах (гидролиз, ацидиолиз, комплексолиз) каждый элемент « освобождается » более или менее быстро, в зависимости от его локализации в минерале и чувствительности этого последнего к выветриванию. Реакция микроелемента зависит тогда от его физико-химических характерностей : pK (определяющее его дальнейшее существование в форме простых, гидроокисленных, осолоненных, или комплексированных ионов) и $^{rh}$ (определяющее степень его окисления в зависимости от условий среды). Растворимость каждой из этих форм позволяет предвидеть степень их подвижности. Сравнительное изучение этих подвижностей в гидролитических условиях, в присутствии углекислоты, или в комплексирующей среде, приводит к их разделению на 5 больших категорий : A, B, C, D, E (элементы содержащие растворимые, слабо растворимые, совсем нерастворимые гидроокислы, элементы содержащие уплотненые и плохо растворимые гидроксикислоты, элементы содержащие простые, хорошо растворимые гидроксикислоты).

Таким образом поведение каждого микроелемента после экстракции приблизительно укладывается в рамки категории к которой он причислен.

На поверхности земного шара, где условия среды определяются главным образом процессами почвообразования, поведение микроелементов — аналогично, как это было уже доказано экспериментально и подтверждено новыми работами с применением почв различной природы и разного географического происхождения.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


AHRENS L. H., (édité par) 1968. *Origin and distribution of the elements*. Pergamon Press. London. 1178 p.

BRUCKERT S., 1966. Répartition des acides hydrosolubles dans quelques profils de sols forestiers. *C. R. Acad. Sci.*, **263** D, 1572-1575.

CHARLOT G., 1963. *L'analyse qualitative et les réactions en solution*, 442 p. Masson Éd.

CHARLOT G., 1966. *Les méthodes de la chimie analytique. Analyse quantitative minérale*. Masson, 1 023 p.

COPPENET M., 1956. Sur l'origine des carences en cuivre. *Comptes rendus VI^e Cong. Int. Sci. Sol. Paris*, B, 493-497.

COPPENET M., CALVEZ J., 1967. Les oligo-éléments et en particulier le cobalt dans les sols et les fourrages du Finistère. *C. R. Acad. Agric.*, **53**, 939-947.

DUCHAUFOUR Ph., 1957. Sur le rôle de la matière organique dans les phénomènes de lessivage et de podzolisation. *C. R. Acad. Sci.*, **245**, 1154-1157.

DUVAL L., 1963. Existence de graves carences en cuivre dans les sols grèseux de la Basse-Normandie et du Bas-Maine. *C. R. Acad. Agric.*, **49**, 1216-1220.

DUVAL L., 1967. Sur la teneur en cuivre des sols granitiques de la Basse-Normandie et du Bas-Maine. *Bull. Mayenne Sciences*, II, 91-98.

GOLDSCHMIDT V. M., 1937. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks *J. chem. Soc.* (London), 655-673.

GOLDSCHMIDT V. M., 1945. The geochemical background of minor-elements distribution. *Soil Sci.* **60**, 1-7.

GOLDSCHMIDT V. M., 1954. *Geochemistry*, Oxford, 730 p.

GONI J., 1966. Contribution à l'étude de la localisation et de la distribution des éléments en traces dans les minéraux et les roches granitiques. *Mémoire B. R. G. M.*, (45), 68 p.

GRAINDOR M.-J., 1959. Age des granites, granitisation et migmatisation dans le Massif armoricain. *B. S. G. F.*, 555-566.

GRAINDOR M.-J., 1961. A propos des mouvements varisques dans le Massif armoricain. *C. R. som. S. G. F.*, 54-56, 1 carte.

JACQUIN F., BRÜCKERT S., 1965. Identification et évolution des acides hydrosolubles de deux litières forestières. *C. R. Acad. Sci.*, **260**, 4556-4559.

KOVDA V. A., YAKUSHEVSKAYA J. V., TIURINKANOV A. N., 1958. Le problème des micro-éléments dans les sols de l'U. R. S. S. *Izv. Akad. Nauk. U. R. S. S.*, **4**, 562-570 (en russe).

KRAUSKOPF K. B., 1967. *Introduction to geochemistry*. Mac Graw Hill, New York, 721 p.

LAPADU-HARGUES P., 1968. *Conférences de Géochimie*. Clermont-Ferrand, 179 p.

LAUNAY L. (de), 1913. *Traité de métallogénie*. Paris, 3 volumes.

LOSSAINT P., 1959. Étude expérimentale de la mobilisation du fer des sols sous l'influence des litières forestières. *Ann. agron.*, 369-414, 493-542.

MAURICE J., 1966. Géochimie du bore. *Ann. agron.*, **17**, 367-402.

MITCHELL R. L., 1960. Trace-elements, in *Chemistry of the soil*. A. C. S. Monograph, 126 Reinhold, New York, 253 p.

NALOVIC L., PINTA M., 1969. Recherches sur les éléments-traces dans les sols tropicaux : étude de quelques sols de Madagascar. *Geoderma*, **3**, 117-132.

OBUKHOV A. I., 1968. Behavior of micro-elements during weathering and soil formation in the tropics and subtropics of Burma. *Soviet Soil Sci.* (13), 1894-1901.

PEDRO G., 1966. Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles (cycle alumino-silicique). *C. R. Acad. Sci.*, **262**, D, 1828-1831.

PEDRO G., 1968. Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe. Présentation d'une esquisse géographique. *Rev. géogr. phys. géol. dyn.*, X, 457-470.

PEDRO G., TROCMÉ S., BÉTRÉMIEUX R., JAMAGNE M., 1968. *La prospection géochimique des éléments-traces dans les sols avec établissement de cartes géochimiques superficielles; son utilisation en Métallogénie et son intérêt en Agronomie*. I. N. R. A., Département d'Agronomie, document ronéotypé, 71 p.

PERELMAN A. I., 1967. *Geochemistry of epigenesis*. Plenum Press, New York, 266 p.

PINTA M., OLLAT C., 1961. Recherches physico-chimiques des éléments-traces dans les sols tropicaux. Étude de quelques sols du Dahomey. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **25**, 14-23.

RAMBAUD D., 1969. *Étude sur la répartition des éléments-traces dans quelques sols ferrallitiques*. Thèse, Paris (ronéo), 157 p.

RANKAMA K., 1946. On the geochemical differentiation in the earth's crust. *Bull. Comm. Geol. Finlande*, (137).

RANKAMA K., SAHAMA Th. G., 1950. *Geochemistry.* Univ. Chicago Press, 912 p.

RINGBOM A., 1967. *Les complexes en chimie analytique.* Dunod, Paris, 369 p.

RUSSEL J., 1961. *Soil conditions and plant growth,* Londres, 688 p.

SHAW D. M., 1964. *Interprétation géochimique des éléments en traces dans les roches cristallines.* Masson, 237 p.

SHERBINA W. V., 1969. Causes of isomorphism limitation. *Geokhimia,* **11**, 1302-1305 (en russe).

SWAINE D. J., MITCHELL R. L., 1960. Trace elements distribution in soil profiles. *J. Soil. Sci.*, **11**, 347-368.

SWINDALE L. D., JACKSON M. L., 1956. Genetic processes in some residual podsolised soils of New Zealand. *VI^e Cong. Internat. Sci. Paris,* E, 233-239.

TARDY Y., 1969. *Géochimie des altérations. Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique.* Thèse. Strasbourg, 274 p. (sous presse).

TAUSON L. V., 1954. Sur les formes de certains éléments rares dans les roches éruptives. *Dokl. Akad. Nauk S. S. S. R.*, **95**, 1247-1250 (en russe).

TUREKIAN K. K., WEDEPOHL K. H., 1961. Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust. *Bull. geol. Soc. Amer.*, **72**, 175.

VINOGRADOV A. P., 1956. Distribution des éléments chimiques dans l'écorce terrestre. *Geochimia,* **1**, 6-52 (en russe).

WEDEPOHL K. H., 1967. *Geochimie.* Walter de Gruyter and Co, Berlin, 221 p.

WEDEPOHL K. H., 1969. *Handbook of geochemistry.* Tomes I et II.

WRIGHT J. R., LE VICK R., ATKINSON H. J., 1955. Trace elements distribution in virgin profiles representing four great soil groups. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **19**, 340-344.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (5), 519-548.

# INFLUENCE DE LA FERTILISATION ET DE DIVERSES TECHNIQUES DE CULTURE SUR L'ALIMENTATION DES PLANTES EN OLIGO-ÉLÉMENTS

S. TROCMÉ

*Station centrale d'Agronomie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles*
*Institut national de la Recherche agronomique*

## RÉSUMÉ

La présence ou l'absence d'insuffisances ou d'excès en oligo-éléments, dans la pratique agricole et horticole, sont souvent en relation, parfois de façon prépondérante, avec les diverses techniques de culture utilisées. Différentes observations sont présentées à ce sujet, concernant l'emploi des amendements calcaires et organiques, des engrais chimiques et des pesticides, l'irrigation, l'aération et le tassement des sols, la stérilisation à la vapeur, le choix des espèces et des variétés, les époques de culture. Un exemple de l'action globale d'un ensemble de facteurs est proposé, relatif aux modes d'entretien du sol en arboriculture fruitière.

La question de l'influence de l'utilisation systématique d'oligo-éléments dans la fertilisation est étudiée notamment en discutant l'efficacité de certaines formes (complexes, produits peu solubles) et l'action des oligo-éléments sur le rendement ou la qualité des récoltes dans l'éventualité de subcarences ou de prétoxicités.

## INTRODUCTION

Au cours des vingt-cinq dernières années, on a observé sur les cultures un assez grand nombre d'insuffisances en oligo-éléments, inconnues en France auparavant. Une première explication serait qu'on est parvenu à des appauvrissements excessifs des sols, les prélèvements et les exportations d'oligo-éléments ayant augmenté avec les rendements alors que diminuaient les apports par des engrais plus concentrés en éléments majeurs. Sans exclure cette éventualité, on peut faire remarquer que les conséquences d'un caractère déficitaire du bilan, à court ou à long terme, ne sont pas comparables entre oligo-éléments et éléments majeurs. Le tableau I (TROCMÉ, 1953) montre en effet que les réserves des sols sont, relativement, beaucoup plus élevées pour les oligo-éléments, l'approvisionnement pouvant être considéré comme variant en sens inverse du rapport teneur des plantes/teneur des

sols. Bien entendu, un tel tableau n'a qu'une valeur indicative ; il ne s'agit que d'approximations, et l'on sait que la richesse d'un sol en éléments totaux n'est pas nécessairement en relation avec l'alimentation des végétaux. Il n'en demeure pas moins que, en l'absence de restitutions, l'épuisement des sols sera en moyenne beaucoup moins accusé pour les oligo-éléments que pour les éléments majeurs, ce qui, dans une certaine mesure, rend compte du fait que les sols puissent alors rester longtemps fertiles.

TABLEAU I

*Teneurs comparées des sols et des végétaux en éléments majeurs et en oligo-éléments*

| | Éléments majeurs | | | | | | Oligo-éléments | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | N | S | P | K | Mg | Ca | Fe | Mn | Zn | Cu | B | Mo |
| (1) : ‰ de matière sèche des végétaux... | 20 | 2 | 4 | 20 | 3 | 16 | 0,1 | 0,05 | 0,03 | 0,01 | 0,02 | 0,0015 |
| (2) : ‰ de sol ..... | 1 | 0,1 | 0,4 | 15 | 3 | 4 | 20 | 1 | 0,1 | 0,02 | 0,04 | 0,003 |
| Rapport $\frac{(1)}{(2)}$ ..... | 20 | 20 | 10 | 1,3 | 1 | 4 | 0,005 | 0,05 | 0,3 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |

Une seconde explication fait intervenir la mise en œuvre, ou l'intensification, ou l'effet à long terme, de techniques culturales qui, par des actions diverses, diminuent l'absorption et l'utilisation des oligo-éléments par les végétaux.

Inversement, il y a lieu de considérer ce que représentent encore les apports d'oligo-éléments par différents produits (amendements, engrais, pesticides), appoints utiles ou doses présentant des risques de toxicité, et de voir dans quelle mesure des techniques culturales peuvent avoir aussi une action favorable sur la satisfaction des besoins des cultures en oligo-éléments.

Nous chercherons donc à rappeler quelques données obtenues en France ces dernières années sur l'influence de divers facteurs relevant de l'intervention humaine, permettant de rendre compte de la manifestation de certaines carences ou toxicités, ou du maintien d'une fertilité apparemment satisfaisante malgré l'absence de tout programme intentionnel de fertilisation en oligo-éléments. Une seconde partie discutera l'utilisation systématique de ces derniers.

## PREMIÈRE PARTIE

## INFLUENCE DE DIVERS FACTEURS SUR L'ALIMENTATION ET LA NUTRITION DES CULTURES EN OLIGO-ÉLÉMENTS

### 1. — *Amendements calcaires*

Il a été maintes fois constaté que des carences en oligo-éléments étaient apparues à la suite d'applications d'amendements calcaires : par exemple, carences en manganèse sur céréales en Bretagne, carences en zinc sur maïs dans le Sud-Ouest, ou

sur lin dans la Région parisienne, carences en bore sur betteraves en diverses régions, etc. On sait également que les marnages des vergers doivent être pratiqués avec prudence en raison des risques de chlorose ferrique qu'ils comportent. Les mécanismes mis en jeu, plus ou moins bien connus d'ailleurs, ont été discutés antérieurement en détail pour certains éléments (zinc, DARTIGUES, 1964 ; bore, MAURICE et TROCMÉ, 1965) et repris dans leur ensemble, dans ce même numéro des *Annales*, à propos des toxicités, par JUSTE. On rappellera simplement les observations effectuées sur quelques aspects particuliers, qui ne sont sans doute pas prépondérants, mais qui se rattachent à autre chose que l'action propre de l'élévation du pH sur l'assimilabilité des oligo-éléments :

— Il a été confirmé, à propos du bore, que le chaulage pouvait conduire à une augmentation des besoins des cultures en cet élément, en plus de celle correspondant à une plus grande formation éventuelle de matière végétale (MAURICE et TROCMÉ, 1965). Autrement dit, les besoins en bore seraient plus élevés lorsque l'absorption du calcium par les plantes augmenterait (action antagoniste du bore vis-à-vis de troubles dans le métabolisme des glucides consécutifs au chaulage, STEKLOVA, 1959). Une telle hypothèse n'est pas à exclure pour d'autres oligo-éléments (zinc, DARTIGUES et LUBET, 1967).

— Dans le cas d'applications de marnes, des phénomènes d'adsorption par l'argile renfermée en quantités importantes par ces amendements limiteraient les disponibilités en certains oligo-éléments (cas du zinc dans les sols sableux du Sud-Ouest, DARTIGUES et LUBET, 1967).

— Les calcaires peuvent exercer une action protectrice par dépôt à la surface des particules minérales rendant les oligo-éléments préexistants plus difficilement accessibles aux actions de dissolution : cela a pu intervenir, avec beaucoup d'autres causes, dans l'apparition des carences en manganèse après arrosages aux eaux d'égout renfermant des particules calcaires en suspension (TROCMÉ et BARBIER, 1950).

Les conséquences des chaulages sont actuellement bien connues, et l'on parle couramment de risques de « blocage » des oligo-éléments, ou de « maladies de la marne ». Les palliatifs préconisés, compte tenu des avantages que présentent par ailleurs les applications d'amendements calcaires, varient selon les conditions rencontrées :

— On peut envisager une limitation de l'importance des chaulages. Les risques d'insuffisance en oligo-éléments après chaulage sont d'autant plus à craindre que les sols sont initialement plus pauvres. Ainsi, dans les sols humifères de Bretagne renfermant plus d'un certain taux de Mn total (au moins 500 p.p.m., ce qui correspond à un certain niveau de Mn facilement réductible), les chaulages n'amènent jamais de carence en manganèse (COPPENET, 1959). Dans les sols plus pauvres on limitera les applications d'amendements calcaires de façon à ne pas dépasser un pH maximum (6,1). En l'espèce, cette solution est satisfaisante, la structure étant naturellement stable dans ces sols humifères.

— On peut aussi concevoir d'apporter, simultanément aux amendements calcaires, les oligo-éléments qui risquent de faire défaut. La question se pose de savoir si l'apport d'oligo-éléments au sol ne risque pas alors d'être inefficace. En fait, on a pu montrer que des applications de borax compensaient, pour des périodes prolongées, la diminution de l'alimentation en bore résultant de l'élévation de pH par

chaulage (MAURICE et TROCMÉ, 1955) ; autrement dit, le taux de bore soluble à l'eau, l'absorption de bore par les plantes, sont en définitive plus faibles lorsqu'il n'y a pas eu d'apport d'amendement calcaire ni de borax que si l'on a apporté l'un et l'autre, sans qu'il soit nécessaire cependant d'appliquer le bore à doses extrêmement élevées. Ces résultats concernent notamment certains sols dont la stabilité structurale passe par un minimum en milieu légèrement acide ; c'est le cas de sols de la Région parisienne formés sur limons des plateaux, pauvres en argile, riches en limon et sables très fins ; ces sols battants ne conservent une bonne structure que s'ils renferment un léger excès de calcaire portant leur pH aux environs de 8 (MONNIER, 1960).

Parallèlement, l'application de borax devra être plus importante après un chaulage de redressement modifiant nettement et rapidement le pH. Si on a observé parfois des carences en bore en terres chaulées et boratées, c'est sans doute parce que les applications de bore, maintenues aux doses usuelles, étaient alors insuffisantes. Il serait théoriquement concevable de déterminer au laboratoire les quantités de bore à ajouter pour que, par exemple, le taux de bore soluble d'un sol atteigne après chaulage une valeur donnée. En fait, cette détermination, et son interprétation, se heurteraient à des difficultés comparables à celles que présente la seule détermination au laboratoire du besoin en chaux d'un sol.

Pour d'autres éléments, notamment le zinc et surtout le manganèse, l'apport au sol dans ces conditions est souvent inefficace, quelles que soient les formes appliquées. Il faut alors envisager d'apporter ces éléments par des pulvérisations ou des poudrages sur les parties aériennes, ce qui peut se faire en général sans inconvénient, notamment lorsque ces traitements accompagnent des traitements herbicides (exemple : manganèse sur céréales), ou insecticides (exemple : zinc sur lin). Retenir cette solution pour le bore est également concevable et d'ailleurs couramment pratiqué actuellement ; on peut objecter cependant que le résultat risque d'être inférieur à celui obtenu par apport direct au sol (voir plus loin).

Par ailleurs, l'action des amendements calcaires sur l'assimilabilité des oligo-éléments est utilisée pour combattre les insuffisances de molybdène et diverses toxicités (voir plus loin, JUSTE, Actions toxiques des oligo-éléments).

On a peu de données sur les teneurs en oligo-éléments des amendements calcaires, variables selon leur origine. Il ne semble pas qu'il faille en exagérer l'importance et l'intérêt : ainsi les calcaires marins et les calcaires dolomitiques utilisés dans le Massif armoricain sont très pauvres en cuivre (environ 4 g par t), et assez riches en manganèse (environ 150 g par t pour les calcaires marins, 300 g pour les calcaires dolomitiques), mais encore insuffisamment pour compenser l'action des chaulages sur l'assimilabilité de cet élément (DUVAL, 1966).

Quant à l'utilisation systématique d'agents acidifiants pour favoriser l'alimentation en oligo-éléments, elle n'a pas conduit actuellement à des applications pratiques. COPPENET (1956) a montré que l'enfouissement de 2 à 3 t de soufre par ha provoquerait une acidification suffisante pour prévenir les carences en manganèse sur céréales en Bretagne, mais qu'une telle opération est onéreuse et ne présente qu'un intérêt limité, les cultures autres que les céréales se développant bien dans ces terres non acidifiées.

### 2. — *Matières organiques*

a) *Action directe.*

Les matières organiques apportées au sol ont une action directe sur l'alimentation des cultures par les oligo-éléments qu'elles renferment et qu'elles libèrent au cours de leur décomposition. Ainsi l'approvisionnement en oligo-éléments est-il en général largement assuré, en horticulture, par l'application de matières organiques non produites sur l'exploitation. L'apport de bore par les fumiers (1 à 6 g par t, JOUIS et HANGARD, 1957 ; FIORAMONTI et MARTY, 1960 ; DUVAL, 1966) ou par les pailles, risque cependant d'être insuffisant, les graminées étant relativement pauvres en cet élément (G. BERTRAND et de WAAL, 1936). Les teneurs des fumiers en autres oligo-éléments sont de l'ordre de 600 g Fe, 75 g Mn, 5 g Cu par t. La richesse des gadoues ou composts d'ordures ménagères est très supérieure à celle des fumiers (FIORAMONTI, 1960 ; CHABANNES et HERVO, 1964 ; FLON, 1966). Les teneurs en cuivre de certains composts (300 g par t) sont suffisamment élevées pour justifier une limitation des apports annuels à 30 à 40 t par ha. Les teneurs en bore des gadoues ou des composts sont relativement plus faibles (15 à 20 g par t) et seules des applications excessives et répétées risqueraient de provoquer à la longue une accumulation de bore nocive (CHABANNES et HERVO, 1964). Les goémons ou varechs utilisés en Bretagne sont plus pauvres en manganèse et en cuivre que les fumiers (4 à 20 g Mn, 0,5 à 2 g Cu par t de produit humide, DUVAL, 1966).

b) *Action indirecte.*

L'influence propre des matières organiques sur l'absorption des oligo-éléments est complexe et a fait l'objet d'observations parfois contradictoires :

D'une part, on considère souvent que les matières organiques, en dehors d'une action spécifique sur l'absorption de tous les éléments minéraux, augmenteraient l'assimilabilité et la mobilité des oligo-éléments préexistants ou ajoutés dans le sol, grâce à des phénomènes de dissolution, de réduction (fer, manganèse), de complexage, ce qui expliquerait par exemple la guérison ou la prévention de carences en arboriculture fruitière (chlorose notamment), grâce à l'enherbement ou aux engrais verts. Au laboratoire, on peut ainsi enregistrer des augmentations massives de certaines formes d'oligo-éléments considérées comme assimilables : après addition de 1 p. 100 de glucose à un sol de limon, le taux de Mn échangeable est passé de 1,1 à 34 p.p.m. en 40 jours, ce qui doit correspondre à la réduction à l'état bivalent de formes plus oxydées (TROCMÉ et *al.*, 1950) ; le taux de bore soluble d'un sol de limon calcaire est passé de 0,33 à 0,45 ou 0,85 p.p.m. en une demi-heure par addition de 2 ou 10 p. 100 de glucose, sans doute par formation de complexes solubles à partir de borates du sol (CORNILLON, 1970).

D'autre part, on a signalé que l'application de matières organiques pouvait faire apparaître des carences en oligo-éléments (DARTIGUES, 1964), ou faire disparaître des toxicités, en cuivre notamment (JUSTE, voir plus loin). C'est un fait d'expérience également que les sols riches en matière organique, et surtout en vieille matière organique, sont souvent sujets à des carences en oligo-éléments. Les phénomènes mis en jeu, selon les éléments considérés ou les situations, ne sont pas toujours bien expliqués. On peut relever à ce sujet les observations suivantes :

— les phénomènes constatés au laboratoire avec des matières organiques pures

ne se vérifient que beaucoup plus irrégulièrement avec des matières végétales moins rapidement fermentescibles, telles que de la paille ou du foin : dans les mêmes conditions que ci-dessus, le taux de Mn échangeable n'a augmenté, en présence de foin, que si on supprimait l'oxydation biologique, par addition de chloroforme ; il passait alors de 1,1 à 51 p.p.m. avec foin et à 116 p.p.m. avec glucose (TROCMÉ et *al.*, 1950). Le taux de bore soluble n'augmentait pas après apport de paille, et, avec foin de trèfle, n'augmentait que d'une quantité très inférieure aux quantités de bore apporté par la matière végétale (CORNILLON, 1970). Entre autres hypothèses, on peut envisager une rétention sous forme insoluble par les microorganismes développés au cours de la fermentation. Quoi qu'il en soit, l'effet de matières organiques diverses risque de différer notablement selon leur origine ;

— les matières organiques donneraient lieu à la formation de complexes organo-métalliques insolubles, ou suffisamment stables pour être sans activité dans l'alimentation des végétaux (cas du cuivre notamment, DELAS, 1967 ; JUSTE, voir plus loin) ;

— la formation de complexes avec les fractions les plus mobiles de la matière organique accélérerait l'appauvrissement du sol, ou permettrait l'élimination d'éléments atteignant des doses toxiques (cuivre, DELAS, 1967). De même, les eaux d'égout en irrigation ont conduit à la longue à un appauvrissement considérable de sols sableux de la Région parisienne, par lessivage du manganèse passé en solution sous l'influence de leur action réductrice (voir plus loin) ;

— l'action des matières organiques peut varier avec le pH du milieu ; d'après les observations de COPPENET (1959), en milieu acide, les matières organiques facilitent la réduction et la mise en solution des oxydes manganiques, alors qu'en sols neutres ou alcalins on observe un effet inverse, d'autant plus accusé que les matières organiques sont plus abondantes (l'augmentation du pH pourrait favoriser la rétention du manganèse sous forme de complexes organo-manganiques) ;

— par accumulation de résidus à la surface des particules minérales, les matières organiques rendraient les oligo-éléments préexistants ou ajoutés moins accessibles aux racines, ou aux agents susceptibles de les complexer, les réduire et les dissoudre (par exemple, dans les terres irriguées aux eaux d'égout, l'élimination des acides humiques par une solution ammoniacale double ou triple le Mn échangeable extrait ultérieurement, TROCMÉ *et al.*, 1950).

En définitive, il est souvent difficile de faire la part des actions favorables ou défavorables dans les observations effectuées. L'étude des complexes organo-minéraux du sol et de leur stabilité, déjà entreprise (COURPRON, 1967 ; JUSTE et DELAS, 1967), doit permettre d'obtenir des précisions à ce sujet.

### 3. — *Engrais*

a) *Oligo-éléments apportés par les engrais.*

L'apport d'oligo-éléments par les engrais chimiques, notable dans certains cas, tend à s'abaisser à mesure que l'on s'oriente vers la fabrication d'engrais plus concentrés. Cependant on a déjà fait remarquer qu'il ne fallait pas exagérer l'importance de cet inconvénient, puisque, de toute façon, les oligo-éléments contenus dans les

engrais étaient sous la dépendance des produits ayant servi à leur fabrication et que leur présence et leur teneur étaient sans rapport avec les besoins réels des cultures dans des conditions déterminées (BOISCHOT et PULBY, 1966).

Par ailleurs, on connaît mal l'assimilabilité des oligo-éléments ainsi appliqués. Les observations ont surtout porté sur le manganèse des scories de déphosphoration, dont les teneurs en cet élément sont toujours élevées (2 à 5 p. 100 Mn) ; des résultats de sens divers ont été ainsi enregistrés :

— Dans des essais en pots sur sols de Bretagne, les carences en manganèse des céréales ont été prévenues par des apports de scories de l'ordre de 10 t par ha, et atténuées par des apports de l'ordre de 1 à 4 t, correspondant à l'application répétée de fortes doses de scories pendant plusieurs années (COPPENET, 1959) ; ces résultats se sont montrés en accord avec des observations faites au cours d'expérimentations au champ sur les mêmes types de sols. De même, en sol neutre, pauvre en manganèse, dans le Sud-Est, des applications de l'ordre de 3 t par ha ont entraîné une certaine augmentation du taux de Mn des plantes (67 p.p.m. contre 54 p.p.m. avec superphosphate, dans la matière sèche de feuilles de haricots, GOUNY *et al.*, 1963). Dans le sol de limon de l'expérience dite des 42 parcelles à Versailles, le taux de Mn échangeable n'a pratiquement pas varié après 18 applications annuelles de 1 000 kg de scories à 2,3 p. 100 Mn par ha, mais on retrouve sous forme facilement réductible (à l'hydroquinone) plus de la moitié du manganèse ainsi incorporé; parallèlement, le pH du sol s'est élevé de 6,4 à 7,6 (TROCMÉ, 1953).

— Par contre, COPPENET (1959) signale que des insuffisances de manganèse se manifestent parfois en Bretagne dans des exploitations où l'on utilise des scories depuis plusieurs années, ou que le taux de manganèse des fourrages n'est pas augmenté par apports de cet engrais, ce qui rejoint les observations de STENUIT en Belgique (1963), d'après lesquelles des fumures répétées sous forme de scories (150 kg $P_2O_5$ par ha et par an) n'ont pas empêché, au champ, l'apparition de symptômes de carences en manganèse, ni modifié le taux de Mn « actif » (échangeable + facilement réductible), dans des sols de pH 5,5 à 6,5.

En définitive, si le manganèse des scories peut être considéré, au moins en partie, comme susceptible de participer à l'alimentation des végétaux, on conçoit que les résultats enregistrés varient selon les conditions locales, comme d'ailleurs ceux obtenus avec tout autre produit renfermant du manganèse. Il y a lieu de faire intervenir :

— le fait que les apports de manganèse, quelle qu'en soit la forme, restent souvent peu efficaces, sinon à doses considérables (plus de 100 kg Mn par ha) ;

— l'action alcalinisante des scories ;

— les différences vraisemblables d'activité selon l'origine et le type de fabrication des scories.

On s'est demandé si, en sols peu acides, riches en manganèse, les scories ne risqueraient pas de provoquer des toxicités en cet élément. Cette crainte n'a pas été confirmée : dans des essais en vases de végétation, même avec des doses correspondant à 3 tonnes de scories par ha, le taux de Mn des plantes n'a que peu augmenté (135 p. p. m. dans la matière sèche de feuilles de haricots, contre 120 p. p. m. avec superphosphate), sans doute par suite de l'élévation du pH du milieu jusqu'à la neutralité (GOUNY *et al.*, 1963).

Aucune observation ou étude particulières suivies n'ont été effectuées à notre connaissance sur l'action possible d'autres oligo-éléments contenus accessoirement dans les engrais usuels, ce qui n'en exclut pas l'éventualité. (Le nitrate de soude du Chili renferme environ 0,5 p. 100 de bore assimilable, mais est relativement peu utilisé.)

b) *Action indirecte.*

En dehors des actions faisant intervenir des modifications du pH, on peut enregistrer des effets négatifs ou positifs des engrais sur l'absorption des oligo-éléments, en relation avec des phénomènes d'antagonisme ou de synergie entre éléments, ou avec les formes d'application de certains engrais. En voici quelques exemples :

1. *Effets négatifs.*

Les antagonismes (diminution de l'absorption d'un élément lorsque le milieu s'enrichit en un autre élément) ont parfois des conséquences agronomiques importantes. La richesse des sols en phosphore assimilable, notamment, s'est souvent montrée en relation avec l'apparition de carences en zinc sur arbres fruitiers (BARBIER *et al.*, 1950 ; DELMAS, 1953, 1955), sur maïs (COPPENET et DUVAL, 1965 ; DARTIGUES et LUBET, 1968), sur lin, sans cependant que l'on puisse considérer qu'il s'agisse d'un facteur déterminant, d'autres facteurs intervenant souvent simultanément (ex. : pH, tabl. 2). Dans des essais en pots sur maïs, cultivés en sols du Sud-

TABLEAU 2

*Relations entre carences en zinc du lin et composition des sols*
(limons de la Région parisienne)

| | Partie saine | Partie malade | Partie saine | Partie malade | Partie saine | Partie malade | Partie saine | Partie malade |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Calcaire % ..... | 0 | 0,75 | 0 | 2,7 | 0,8 | 3,5 | 0 | 2,5 |
| pH $CaCl_2$ N/100 ..... | 6,85 | 7,35 | 6,80 | 7,55 | 7,45 | 7,50 | 6,20 | 7,15 |
| $P_2O_5$ assim. (Dyer) .. | 0,24 | 0,41 | 0,23 | 0,37 | 0,18 | 0,21 | 0,35 | 0,34 |

Ouest carencés en zinc, on a observé des diminutions de rendements par applications de phosphore (sous forme d'orthophosphate), ce qui correspondait à une baisse du taux de zinc extractible à l'acétate d'ammonium normal, d'autant plus accusée que les doses de phosphore étaient plus élevées (cela n'exclut pas l'intervention de mécanismes purement physiologiques). Le rendement maximum était obtenu par application simultanée de phosphore et de zinc (SINGH et DARTIGUES, 1970).

Des insuffisances de zinc et de cuivre ont été observées sur pommes de terre en sols de limon ayant reçu de fortes fumures phosphatées (REDLICH, 1962).

Dans le même ordre d'idées, l'antagonisme phosphore-aluminium est exploité dans la culture des hortensias : des arrosages avec des solutions riches en phosphore, au cours du forçage, améliorent les colorations roses en éliminant les traces de bleu dues à la formation de complexes organiques avec l'aluminium (TROCMÉ, 1963).

2. *Effets positifs.*

Dans des sols de Bretagne carencés en manganèse, le nitrate de chaux, engrais non acidifiant, augmente nettement l'absorption par l'avoine du manganèse préexistant ou ajouté dans le sol, en désaccord avec la loi du minimum. Dans le cas particulier de cet élément, l'action de l'engrais azoté serait à rattacher à la vie microbienne du sol, surtout au niveau de la rhizosphère (Coïc et Coppenet, 1958).

L'absorption de manganèse peut également augmenter avec la fumure phosphatée, comme on l'a observé dans des expériences culturales de longue durée (Trocmé, 1961). On sait cependant que la synergie P/Mn, souvent signalée, est loin d'avoir un caractère général (exemple : Delmas *et al.*, 1958).

L'absorption du potassium, si elle n'est pas excessive, facilite l'absorption et le mouvement du fer (acidification au niveau de la rhizosphère, augmentation de la teneur des plantes en acide citrique) ; ainsi s'expliquerait l'effet bénéfique de fumures potassiques vis-à-vis de chloroses ferriques, parfois observé en milieux pauvres en potasse. Mais au-delà d'un certain optimum, une absorption excessive de potassium, en altérant le métabolisme des végétaux et notamment en augmentant le pH cellulaire, apparaît comme un des facteurs possibles de la chlorose ferrique (Gouny et Mazoyer, 1953).

En sols du Sud-Ouest où le maïs est carencé en zinc, les rendements ont pu être accrus par le seul apport de sulfate de magnésium, bien que les sols soient suffisamment pourvus en ce dernier élément (hypothèse proposée : libération de zinc des argiles par le magnésium). Cet effet n'a pas lieu en présence de fortes doses de phosphates, sans doute à cause de l'antagonisme phosphore-zinc (Dartigues et Lubet, 1968).

Dans des expériences avec le même type de sol, des polyphosphates (essentiellement pyro- et tripolyphosphates) augmentent, contrairement à l'orthophosphate, les prélèvements de zinc et le rendement du maïs ainsi que le zinc extractible à l'acétate d'ammonium normal, probablement à la suite de la formation d'un complexe entre polyphosphate et zinc. Des études avec $Zn^{65}$ ont montré que, dans les sols considérés, cette libération de zinc n'était pas passagère, et augmentait avec le temps (Singh et Dartigues, 1970). Lorsqu'on ajoutait du zinc, les rendements étaient les mêmes quelle que fût la forme de phosphate. On n'obtiendrait sans doute pas d'effets favorables de cette nature si les sols étaient initialement très appauvris en zinc, ou si les polyphosphates se transformaient rapidement en orthophosphates, dans des conditions de milieu encore mal connues.

Indépendamment des phénomènes particuliers ainsi mis en jeu, les fumures minérales en éléments majeurs, comme toute autre technique culturale, en agissant sur le métabolisme et la croissance des plantes, sur l'exploitation du sol par les racines, etc., influencent l'absorption des oligo-éléments et la composition des récoltes. On verra plus loin, à propos de l'intensification fourragère, des exemples d'actions diverses des fumures sur la composition des plantes de prairie en oligo-éléments (S. Périgaud, *Les carences en oligo-éléments des ruminants en France*). Il apparaît que selon la richesse du milieu, des résultats de sens opposé peuvent être observés. De toute façon, la fumure minérale en éléments majeurs ne peut être considérée comme de nature à abaisser nécessairement le taux des oligo-éléments dans les végétaux : dans les parcelles de Grignon créées par Dehérain en 1875,

on n'a enregistré, pendant 3 années consécutives, aucune différence dans les teneurs en fer et manganèse du grain de blé, qu'il y eût ou non une fumure minérale (N, P, K), ou une fumure organique (fumier), depuis quelque 80 ans (GUÉRILLOT-VINET *et al.*, 1961). Ces résultats sont à rapprocher de ceux obtenus en Allemagne, où une enquête dans la région de Hesse-Nassau n'a révélé aucune diminution des teneurs en bore, cuivre, manganèse et zinc du grain de blé en relation avec l'intensité de la fumure et l'importance des rendements (JUNGERMANN, 1960).

### 4. — *Pesticides*

Ce sont essentiellement les fongicides qui sont à prendre en considération. Les seuls oligo-éléments concernés actuellement (1) sont le cuivre (traitements organo-cupriques), le manganèse (manèbe, mancozèbe), le zinc (zinèbe, zirame, mancozèbe). Les dithiocarbamates de fer ne sont guère utilisés.

On peut se demander à propos de ces produits :

— s'ils représentent une source valable d'oligo-éléments permettant éventuellement de guérir ou de prévenir des insuffisances ;

— si leur emploi répété risque de provoquer des toxicités.

a) *Valeur des produits utilisés.*

La fourniture d'oligo-éléments par des produits employés à des doses de l'ordre de 150 à 200 g par hl, plusieurs fois par an, est souvent loin d'être négligeable et peut représenter annuellement quelques kg par ha. Tous les traitements au cuivre apportent, relativement aux besoins des cultures, des quantités considérables de cet élément. Les apports de manganèse par le manèbe (20 p. 100 Mn) ou le mancozèbe (16 p. 100 Mn) sont comparables à ceux d'une solution de sulfate de manganèse ($SO_4Mn$, 1 $H_2O$) à 1 p. 1 000, utilisable pour la prévention ou le traitement de carences et représentent plusieurs fois les besoins moyens des cultures. Avec le zinèbe (22 p. 100 Zn), les apports de zinc équivalent à ceux d'une solution à 1,5 p. 1 000 de sulfate de zinc ($SO_4Zn$, 7 $H_2O$), elle aussi utilisable pour combattre des carences. Le zirame (16 p. 100 Zn) correspond encore à un apport quantitatif notable. Le mancozèbe est plus pauvre (2 p. 100 Zn) ; cependant on ne peut exclure que des applications répétées n'entrent en ligne de compte dans l'approvisionnement des cultures.

La valeur nutritionnelle des oligo-éléments ainsi apportés par des produits très peu solubles a fait l'objet à l'étranger de diverses études : EMGE et LINN (1952), MOLLENHAUER et SMITH (1954) ont conclu à une utilisation par les plantes du manganèse du manèbe, du zinc du zinèbe et du zirame. De fait, BADOUR et LÉVY (1964) ont traité des carences en manganèse sur vigne par le seul emploi du manèbe. D'après diverses observations, si les carences en zinc sur arbres fruitiers n'ont pas eu l'extension qu'on imaginait il y a une quinzaine d'années, c'est en raison de l'utilisation du zinèbe et du zirame.

(1) Renseignements aimablement fournis par la Station de Phytopharmacie de l'I. N. R. A. (É. VENTURA).

b) *Risques de toxicité.*

On trouvera discutés plus loin dans d'autres articles (JUSTE, DELAS et DARTIGUES) les problèmes de toxicité dus à la répétition des traitements au cuivre sur vigne et liés à l'acidité ou l'acidification des sols (en particulier par le soufre utilisé comme fongicide). DELAS et DARTIGUES rappellent que les apports de cuivre, plus faibles actuellement à cause de la généralisation des bouillies organo-cupriques (environ 200 g de Cu par hl au lieu de 500 g), restent encore assez importants pour que l'extension de ces phénomènes de toxicité ne soit pas à exclure. La répétition des apports de zinc ou de manganèse, sur divers types de cultures, présente-t-elle les mêmes dangers? On peut faire à ce sujet les remarques suivantes :

— les apports annuels de ces éléments sont bien inférieurs à ce qu'étaient les apports de cuivre, lequel par ailleurs est nécessaire aux plantes en plus faibles quantités. Pour la vigne, les associations cupro-organiques les plus utilisées mettent en œuvre, par hl, 190 g de cuivre + 75 g de zinèbe, ou 130 g de cuivre + 75 g de manèbe ;

— il est probable, comme le soulignent DELAS et DARTIGUES, que les toxicités en cuivre sont les plus redoutables, le cuivre pouvant rester à l'état ionique en quantités notables, même après relèvement du pH. Les toxicités en manganèse ne se rencontrent qu'en milieu très acide ; en milieu neutre, le manganèse appliqué au sol reste en général à peu près inutilisable par les plantes quelle que soit la forme utilisée et même à doses élevées.

En définitive les fongicides se sont montrés, au fil des années, soit bénéfiques en prévenant ou guérissant des carences (carences en zinc ou en cuivre des arbres fruitiers, carences en cuivre en Bretagne, etc.), soit toxiques par suite de leur emploi répété conduisant à l'accumulation d'un élément dans le sol (seul cas observé actuellement en France : toxicité du cuivre). Les tendances actuelles iraient vers une diminution des apports de cuivre en viticulture et en arboriculture, voire une suppression en grande culture (les variétés nouvelles de pommes de terre, ne supportant pas le cuivre, sont plutôt traitées au manèbe ou au mancozèbe), une diminution des apports de zinc (substitution du mancozèbe au zinèbe en arboriculture), une extension des apports de manganèse, le manèbe apparaissant d'un très large emploi. Toutefois beaucoup de cultures, en particulier les céréales et les oléagineux, ne sont pas intéressées par les fongicides précités.

### 5. — *Eaux d'irrigation* (1)

Les teneurs en oligo-éléments des eaux d'irrigation sont évidemment très variables selon leur origine. CORNILLON (1967) indique pour le bassin inférieur du Rhône des valeurs allant de 0,01 (Ardèche) à 0, 025 (Rhône et Durance) et à 0,12 mg de bore par litre (Isère) ; 5 000 m³ par ha et par an fourniraient ainsi de 50 à 600 g de bore. Cet apport n'est donc pas négligeable et dépasse même parfois les besoins

(1) Les eaux de pluie renferment du chlore, en quantités toujours suffisantes pour les besoins des plantes, et particulièrement élevées au voisinage de la mer (le chlore apporté par les précipitations atteint 25 kg par ha et par an en Seine-Maritime, JOUIS, 1968). Des déterminations effectuées sur des eaux de pluie collectées en divers points du territoire ont montré que les apports moyens de bore étaient d'environ 25 g par ha et par an, un peu plus (de l'ordre de 40 g) au voisinage de la mer, qui est relativement riche en cet élément (CHABANNES, 1957). Bien que ces valeurs ne soient pas à négliger, il n'est pas apparu qu'il y eût lieu de surestimer l'importance des apports de bore par les précipitations dans l'alimentation des végétaux.

moyens des plantes. Suivant l'époque de prélèvement, on enregistre également, en un même point, des variations importantes : ainsi à Beaucaire selon l'agence du Bassin Rhône-Méditerranée, on a obtenu entre juillet et novembre les valeurs extrêmes suivantes, en mg par 1 :

Fe : 0,05 à 0,24 ; Cu : 0,01 à 0,25 ; Zn : 0,04 à 0,25 ; Mn : 0,01 à 0,05 ;

ce qui correspond en moyenne à une contribution notable à l'alimentation des cultures.

Les risques éventuels de toxicité sont connus depuis longtemps, à la suite notamment des accidents observés aux États-Unis après irrigation avec des eaux excessivement riches en bore ; les cultures sensibles ne supportent pas plus de 0,5 mg de bore par 1 (EATON, 1935). Aucun cas de ce genre ne semble avoir été observé en France.

Par ailleurs, en dehors d'une action propre sur les cultures (intensification des besoins, extension du système radiculaire, etc.), les eaux d'irrigation (comme les eaux de pluie) peuvent agir sur l'assimilabilité et la mobilité des oligo-éléments. En sol de limon calcaire non travaillé ni irrigué, CORNILLON (1967) constate que, selon l'intensité des pluies de la quinzaine précédente, le taux de bore soluble à l'eau chaude varie, en l'espace de 3 mois, entre des extrêmes de 0,12 et 0,62 p. p. m., les taux les plus élevés apparaissant après des périodes de pluies [1]. L'irrigation, comme la pluie, favorise la solubilisation des composés boratés et contribue ainsi à l'alimentation des cultures ; mais à la longue on risque un appauvrissement excessif si l'irrigation est trop intense. On peut rappeler à ce sujet que dans la Région parisienne les eaux d'égout ont à l'origine favorisé l'alimentation en manganèse par l'action réductrice et dissolvante des matières organiques qu'elles renfermaient ; mais la prolongation des irrigations pendant des dizaines d'années a considérablement appauvri les sols en cet élément (en 1950 le taux de Mn total des sols variait de 250 à 130 p. p. m. selon l'intensité de l'irrigation depuis 70 ans, TROCMÉ *et al.*, 1950). Nous avons ici un des exemples, assez rares en France, de l'apparition d'une carence en un oligo-élément à la suite de l'appauvrissement du sol, lequel a été accéléré par l'intervention de facteurs particuliers. On a signalé cependant plus haut que d'autres causes avaient joué (en particulier la perte d'assimilabilité du manganèse due à l'enrobage des particules minérales par des matières organiques et des calcaires). A la suite de travaux poursuivis en Allemagne, il a été proposé de considérer également l'action toxique éventuelle d'éléments renfermés en quantités importantes dans les eaux d'égout, en particulier zinc, cuivre et molybdène, qui exerceraient une action antagoniste vis-à-vis de l'absorption du manganèse (ROHDE, 1961).

### 6. — *Aération et tassement du sol*

En Bretagne, sur une même parcelle de terrain, les parties relativement tassées (passages d'anciens charrois par exemple) peuvent n'être pas ou que peu atteintes par la carence en manganèse, contrairement à des parties voisines non tassées, normalement très perméables et aérées. Les conditions réductrices créées par le tassement auraient facilité le passage des formes oxydées (tri- et tétravalentes) aux formes bivalentes assimilables ; parallèlement, le taux de Mn assimilable varie par exemple de 0,83 p. p. m. en sol non tassé à 1,10 p. p. m. en sol tassé voisin (COÏC et COPPENET, 1958).

[1] Les relations entre sécheresse et carence en bore avaient été observées depuis longtemps (BURGEVIN et FOEX, 1937).

De même une humidité excessive du sol (manque d'aération) augmente l'alimentation en manganèse dans ces mêmes sols et les prélèvements par les plantes. Un mauvais drainage favorise également l'absorption du molybdène, en sorte que les carences en cuivre sur bétail dues à un excès de molybdène ont été observées, de façon générale, sur des sols mal drainés (cf. BELLANGER *et al.*, 1969).

Par contre, ce sont les maïs des parties les plus tassées qui sont parfois les plus atteints par les carences en zinc ; on peut avancer l'hypothèse que les conditions réductrices faciliteraient l'absorption du fer et accentueraient l'antagonisme fer-zinc, en accord avec l'observation de caractère général sur les taux de fer élevés dans les maïs carencés en zinc (cf. notamment DARTIGUES et LUBET, 1968).

De tels phénomènes ne se manifestent que parce que diverses conditions prédisposent à des carences ou des excès, et leur importance ne doit pas être exagérée. On sait cependant qu'en arboriculture fruitière et en viticulture, les conditions asphyxiantes suffisent parfois à provoquer des chloroses ferriques attribuables non à une alimentation en fer défectueuse, mais au développement et au fonctionnement anormal des racines. C'est ainsi qu'en sol déjà riche en calcaire actif (12 p. 100) la dégradation de la structure résultant d'arrosages avec des eaux saumâtres conduit à des asphyxies racinaires et apparaît comme une cause prépondérante des chloroses ferriques sur orangers dans la région de Tunis, les arbres irrigués à l'eau douce n'étant pas atteints (SAGLIO, 1969).

### 7. — *Stérilisation à la vapeur*

La stérilisation à la vapeur augmente considérablement les disponibilités en manganèse (par exemple, après 4 stérilisations successives, Mn échangeable de sols humifères est passé de 0,8 à 14 p. p. m, ou de 1,1 à 55 p. p. m. ; TROCMÉ *et al.*, 1950). On rattache cette augmentation à une libération de manganèse, ou de substances chélatant le manganèse, par suite de la décomposition de la matière organique au cours de la stérilisation. La stérilisation telle qu'elle est pratiquée en culture maraîchère ou florale peut ainsi accroître notablement l'absorption de manganèse par les cultures. Dans des expériences en sol maraîcher, la teneur en Mn de la matière sèche de laitues était de 140 ou de 30 p. p. m., selon qu'il y avait eu ou non désinfection à la vapeur ; pour la culture suivante, on obtenait encore respectivement des teneurs de 90 et de 30 p. p. m. (TROCMÉ et BRIANT, 1961). On a pensé, sans l'avoir absolument vérifié, que dans certains cas, un des effets positifs de la stérilisation serait de guérir des insuffisances en manganèse (notamment dans les sols de serre de rosiers de la Brie, MAROGER, 1952). En fait, d'une part, de telles insuffisances en sols susceptibles d'être stérilisés paraissent rares, d'autre part, l'efficacité des stérilisations est à rattacher à de nombreux autres phénomènes. Dans des sols maraîchers où la stérilisation s'était montrée favorable, l'application de sulfate de manganèse en pulvérisation sur le feuillage, sans stérilisation, n'a eu aucun effet (TROCMÉ et BRIANT, 1961). En réalité ce sont plutôt les risques, au moins temporaires, de toxicité en sols acides qui seraient à considérer.

### 8. — *Influences spécifiques et variétales*

Il est bien connu que, dans les mêmes conditions de milieu, des espèces (même voisines), ou des variétés d'une même espèce, se montrent plus ou moins sensibles aux carences ou aux toxicités. Cela peut être rattaché à des différences de besoins

en éléments minéraux, en relation avec les productions de matière végétale. Ainsi s'expliquerait, au moins en partie, l'apparition relativement récente de carences en zinc sur maïs avec l'extension de la culture de variétés à gros rendements.

Les différences de sensibilité s'observent également à productions de matière végétale comparables. Par exemple l'orge, tout en étant sensible à la carence en manganèse, l'est beaucoup moins que l'avoine. Les hypothèses présentées à ce sujet sont les suivantes (COÏC et COPPENET, 1958) :

*a*) au stade critique de 4-5 feuilles, l'orge est capable d'absorber plus de manganèse que l'avoine ;

*b*) l'orge semble avoir besoin de moins de manganèse que l'avoine pour l'élaboration de ses substances organiques, donc pour la production de grain.

Les différences de sensibilité à la carence en manganèse selon les variétés d'avoine sont considérables ; elles pourraient être rattachées, dans le cas particulier de cet élément, à la présence dans la rhizosphère d'une population, plus ou moins dense selon les variétés, de bactéries oxydant le manganèse (COÏC et COPPENET, 1958).

Les variétés de maïs montrent également de grandes différences de sensibilité à la carence en zinc, ou même, comme l'ont souligné récemment des travaux américains, des différences dans les interactions phosphore-zinc : chez certaines variétés, on constate un antagonisme entre ces deux éléments, chez d'autres, au contraire, une synergie, chez d'autres, enfin, l'absorption de zinc est sans relation avec l'alimentation en phosphore (HALIM *et al.*, 1968).

Les différences de sensibilité spécifiques ou variétales sont utilisables dans le choix de végétaux adaptés à certaines situations (en particulier pour éviter la chlorose ferrique en arboriculture et en viticulture), ce qui conduit à rechercher et sélectionner des porte-greffe résistants. La sélection est facilitée par la détermination de la capacité de saturation en calcium des racines, une capacité de saturation élevée correspondant à une sensibilité marquée à la chlorose (BLANC-AICARD et DROUINEAU, 1955). Des méthodes de ce genre sont d'autant plus intéressantes que celles dont on dispose actuellement ne présentent qu'un caractère imparfait ; mais elles ne peuvent aboutir qu'à très longue échéance.

On peut également envisager de combattre les toxicités par la sélection de variétés résistantes (voir plus loin, JUSTE, actions toxiques des oligo-éléments).

### 9. — *Époques de culture*

Selon l'époque de croissance des plantes, on a souvent observé une plus ou moins grande sensibilité à des carences en oligo-éléments. Par exemple, les semis tardifs d'avoine, en Bretagne, se montrent moins sensibles aux carences en manganèse que les semis normaux. En Sologne, les producteurs de navets ont constaté que la maladie du cœur noir (carence en bore) n'apparaissait pas lorsque les semis avaient lieu après le mois de mai. On peut faire intervenir à ce sujet :

— des variations dans la disponibilité des éléments au cours du temps (après les mois de mai-juin, il y aurait davantage de manganèse bivalent assimilable, provenant du manganèse facilement réductible ; les céréales traverseraient alors plus facilement la période critique pendant laquelle leurs besoins sont particulièrement accusés, COÏC et COPPENET, 1958) ;

— des variations dans les besoins globaux ou instantanés selon que les conditions de croissance sont plus ou moins favorables, les besoins étant plus facilement satisfaits si la croissance est ralentie. De toute façon, plutôt que d'éviter les symptômes de carence en retardant les dates de semis il est alors préférable de semer à des dates normales, quitte à apporter le manganèse ou le bore qui risquent d'être déficients.

Un exemple permettra de discuter l'influence globale d'un ensemble de facteurs sur la nutrition des cultures en oligo-éléments. Cet exemple concerne un essai sur les modes d'entretien des sols de verger, établi sur pommiers dans la Région parisienne, et décrit antérieurement en détail (GRAS, 1965) : 4 modes d'entretien du sol associés chacun à 2 doses d'azote sont mis en comparaison depuis 1963 : sol nu travaillé, sol nu non travaillé (désherbé à l'atrazine), engrais vert d'hiver (ray-grass d'Italie), enherbement permanent (trèfle blanc-pâturin). On a admis que la composition minérale de feuilles homologues, malgré les quelques réserves que l'on peut formuler à ce sujet, reflétait les conditions comparées de l'alimentation et de la nutrition des arbres. Les premiers résultats obtenus sur éléments majeurs ont été déjà présentés et discutés (TROCMÉ, 1966 ; TROCMÉ et GRAS, 1966). On a rappelé à cette occasion les divers phénomènes que font intervenir les modes d'entretien sur l'alimentation au niveau des racines, sur l'exploration du profil par le système radiculaire, sur l'aptitude des arbres à absorber et utiliser les éléments nutritifs.

Les résultats [1] concernant les oligo-éléments, fer, manganèse et bore, en 1965 et 1966, sont indiqués au tableau 3 (le zinc et le cuivre n'ont pas été déterminés : les apports de ces éléments par les fongicides étaient suffisamment élevés pour niveler les différences éventuelles d'approvisionnement par les racines). Il apparaît que :

— avec engazonnement, les feuilles sont en général plus riches en fer (significatif une fois en 1965). Elles sont plus riches en manganèse que celles des arbres en sol nu travaillé ou avec engrais vert (en 1966). Elles sont constamment plus pauvres en bore que celles des 3 autres traitements ;

— les feuilles des parcelles désherbées sont constamment plus riches en manganèse que celles des 3 autres traitements.

Aucune action de la fumure azotée n'a été observée.

En relation avec les observations sur diverses propriétés du sol (GRAS, 1965), on peut faire intervenir les hypothèses explicatives suivantes :

— action réductrice et complexante des matières organiques sous gazon, favorisant l'assimilabilité du fer et du manganèse et leur migration en profondeur ;

— moins bonne aération du sol dans les parcelles désherbées, favorisant le passage du manganèse à des formes bivalentes assimilables ; peut-être également, action du désherbant lui-même sur la flore microbienne ;

— dessiccation plus marquée du sol sous gazon (non irrigué), limitant l'assimilabilité et l'absorption du bore.

D'autres hypothèses pourraient être mises en avant, les effets enregistrés étant en définitive les résultantes d'influences diverses.

On peut conclure que, si l'alimentation en eau avait été assurée convenablement,

[1] Non précédemment publiés.

TABLEAU 3

*Essai d'entretien du sol en arboriculture*
*Teneur de feuilles de pommier* Reinette du Canada *en fer, manganèse et bore, par million de matière sèche*

| | 24-6-65 | | | 20-9-65 | | | 21-6-66 | | | 23-9-66 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Fe | Mn | B | Fe | Mn | B | Fe | Mn | B | Fe | Mn | B |
| Sol nu travaillé. | 82,9 | 30,8 | 34,9 | 93,0 | 28,7 | 25,0 | 91,8 | 39,1 | 26,3 | 139,7 | 31,0 | 26,9 |
| Sol nu désherbé. | 84,9 | 34,5 | 35,5 | 91,4 | 33,4 | 24,5 | 96,7 | 47,2 | 24,8 | 136,7 | 36,1 | 24,8 |
| Engrais vert ... | 80,2 | 30,1 | 37,0 | 89,4 | 30,0 | 25,2 | 87,9 | 39,0 | 26,8 | 133,9 | 31,7 | 26,6 |
| Engazonnement. | 87,2 | 30,8 | 32,5 | 99,1 | 31,3 | 23,7 | 99,0 | 43,4 | 22,9 | 133,7 | 35,0 | 23,8 |
| Signif. à 5% ... | | DvsTVG | GvsTDV<br>GvsT<br>GvsV | GvsTDV | DvsTVG<br>DvsT<br>DvsG | GvsTDV | | DvsTVG<br>GvsTV | GvsTDV | | DvsTVG<br>GvsTV | GvsTDV |
| CV %. | 6,6 | 11,1 | 6,9 | 8,3 | 8,3 | 5,2 | 9,5 | 4,2 | 11,2 | 9,9 | 11,3 | 9,1 |

D = sol nu désherbé.
G = engazonnement.
T = sol nu travaillé.
V = engrais vert.

c'est avec l'engazonnement que la nutrition d'ensemble en oligo-éléments aurait sans doute été la meilleure. D'autre part, l'emploi du désherbant ne s'est pas traduit par un bouleversement dans les conditions d'absorption des éléments nutritifs (aussi bien majeurs qu'oligo-éléments), et a eu plutôt tendance à agir favorablement. Enfin, l'engrais vert de graminées ne s'est pas différencié du sol nu travaillé, encore que dans d'autres situations on ait parfois constaté des actions favorables dans le traitement de la chlorose ferrique.

Il est difficile de considérer, surtout sans recul suffisant, que les effets enregistrés ont eu une influence sur le comportement des arbres soumis à l'expérimentation. Il n'est cependant pas exclu que dans d'autres situations, la seule mise en œuvre de techniques d'entretien de cette nature suffise à guérir ou prévenir, ou au contraire faire apparaître ou accentuer des insuffisances ou des excès en oligo-éléments.

En définitive, les influences multiples des diverses techniques utilisables dans la pratique agricole ou horticole ne peuvent être négligées pour rendre compte de la présence ou de l'absence d'insuffisances ou d'excès en oligo-éléments, pour essayer de prévoir leur évolution dans l'avenir. On conçoit cependant que les incidences en soient plus ou moins marquées suivant les conditions de sol et de climat, suivant la nature des cultures. Ces conditions apparaissent comme suffisamment déterminantes pour justifier, dans les articles qui suivent, la présentation d'exemples de problèmes agronomiques à partir de quelques régions caractéristiques.

## DEUXIÈME PARTIE

## UTILISATION SYSTÉMATIQUE D'OLIGO-ÉLÉMENTS DANS LA FERTILISATION

### I. — *Valeur alimentaire d'apports d'oligo-éléments sous différentes formes*

Pour combattre les carences actuellement observées en France, on apporte souvent au sol des sels minéraux solubles : borax, sulfate de cuivre, sulfate de zinc. Ces procédés ne sont cependant pas d'utilisation générale : ils seraient dans certains cas peu efficaces (exemple : carences en zinc du lin), ou même totalement inefficaces, sinon pour des doses extrêmement élevées (carences en fer ou en manganèse). Ces échecs sont à rattacher à des précipitations, des oxydations, des formations de complexes insolubles, des rétentions hors de la portée des racines profondes (arboriculture, viticulture), sans cependant être toujours bien expliqués : par exemple les sels manganeux, par oxydation dans le sol, passent certainement sous des formes beaucoup moins solubles, mais c'est également à partir de formes oxydées que les plantes tirent le manganèse du sol, formes qui devraient être moins actives que les oxydes supérieurs de manganèse apparus après apport des sels manganeux, n'ayant subi ni déshydratation ni vieillissement. De même les sels ferreux, qui précipitent

et s'oxydent rapidement dans le sol, sont pratiquement inactifs ; cependant les racines des plantes absorbent du fer même en sol calcaire, et, dans des cultures artificielles sur sable, il suffit de faire précipiter l'hydroxyde ferrique dans la masse du sable pour prévenir la chlorose (BARBIER, 1938).

Dans les situations où les applications de sels sont efficaces, les éléments ainsi apportés sont en général suffisamment fixés pour que l'on conseille pratiquement des doses largement supérieures aux besoins des cultures, ce qui permet en outre une répartition convenable dans le sol. Cependant, les doses ainsi recommandées risquent d'être toxiques dans certaines conditions ; leur reconduction indéfinie, que l'on a tendance à pratiquer, peut présenter également à long terme des risques de toxicité, ce qui a été prévu en particulier à propos des borates, dont on a mis en évidence l'arrière-effet d'applications répétées (BARBIER et CHABANNES, 1953 ; CHABANNES, 1958).

Devant ces difficultés, on s'est demandé si l'alimentation des cultures en oligo-éléments ne pourrait pas être assurée :

1° à partir de composés dans lesquels les oligo-éléments seraient soustraits aux réactions susceptibles de les inactiver (complexes) ;

2° à partir de composés très peu solubles.

a) *Complexes.*

La possibilité d'utilisation de complexes avait déjà été envisagée en 1913 par RIVIÈRE et BAILHACHE ; des ferripyrophosphates avaient permis de traiter avec succès des chloroses de poiriers en terrains calcaires, mais sans qu'il en résultât d'applications pratiques généralisées. DEMOLON et BASTISSE (1944) ont montré qu'il se formait dans les sols des complexes ferro- et ferrisiliciques, où l'ion silicique joue le rôle de vecteur du fer. Ils préparèrent et utilisèrent de tels complexes, dont le fer reste suffisamment mobile pour parvenir à la portée des racines de vignes ou d'arbres fruitiers ; il a été ainsi possible de guérir des chloroses. Mais ces produits n'ont été que peu employés dans la pratique viticole ou arboricole. C'est à partir de conceptions analogues que des travaux américains conduisirent à l'utilisation de chélates (ou chélats), complexes organiques dans lesquels le métal — notamment le fer — est séquestré, non ionisable, donc non précipitable. Ces chélates ont été l'objet, surtout aux États-Unis, de recherches extrêmement nombreuses. Les études effectuées en France ont concerné essentiellement le fer, étant donné la gravité des problèmes posés par la chlorose en terrain calcaire ; elles ont cherché à préciser les points suivants :

— Comportement dans le sol, en comparaison avec les produits déjà connus, sels et complexes siliciques (CHABANNES *et al.*, 1958 ; JUSTE *et al.*, 1961 ; BASTISSE, 1962). Les chélates se montrent plus stables (précipitation du fer plus différée), et plus mobiles (plus grande facilité de mise à la portée des racines profondes). Le complexe ferrique EDDHA (1) se révèle à cet égard plus intéressant que le complexe EDTA (2) qui, tout en restant supérieur aux produits connus antérieurement, est rapidement fixé par le sol et présente une stabilité encore insuffisante en terrain calcaire.

(1) Éthylène diamino-di- (*o*-hydroxyphénylacétate)
(2) Éthylène diamino tétra-acétate.

— Utilisation par les plantes : au moins dans certains cas, les chélates de fer type EDTA sont absorbés sans déchélation préalable (HELLER, 1964).

— Emploi dans la pratique : en aquiculture, les chélates permettent d'éviter l'hydrolyse des sels de fer et leur addition périodique au milieu de culture. En horticulture, les complexes Fe EDTA se sont montrés efficaces vis-à-vis des chloroses que présentent certaines plantes d'ornement lorsque le milieu n'est pas nettement acide ; les arrosages au Fe EDTA permettent ainsi de cultiver des hortensias au forçage en sols neutres ou légèrement acides, ce qui facilite l'obtention de fleurs roses, sans doute en diminuant l'absorption de l'aluminium par les racines et son mouvement jusqu'aux sépales (TROCMÉ, 1963). En arboriculture et viticulture, le Fe EDTA n'est guère utilisable (nécessité d'employer un pal, ou d'arroser copieusement après l'application, résultats irréguliers). Le Fe EDDHA, ou son amide associé à des sels de fer et d'ammonium, est en général efficace, encore qu'on ait observé certains échecs, plus ou moins bien expliqués ; mais son prix élevé, conjugué à la nécessité de renouveler les applications tous les 2 ans, sinon tous les ans, limite sérieusement la généralisation de son emploi (GASSER et MULLER, 1956 ; CHABANNES *et al.*, 1958 ; GUENNELON, 1962 ; LAURENT, 1962 ; LAFON *et al.*, 1964).

Les complexes de fer du type polyflavonoïdes, dans les quelques cas où ils ont été expérimentés en application au sol, n'ont pas montré d'efficacité dans la lutte contre la chlorose en terrains calcaires.

Les complexes organo-métalliques autres que ceux de fer ont été peu étudiés, étant donné que l'on disposait souvent déjà de techniques efficaces pour assurer l'alimentation des cultures. En liniculture, les chélates ne se sont pas révélés plus efficaces que les sulfates pour combattre les carences en zinc en milieux non acides et riches en phosphore (FERNANDEZ et TROCMÉ, 1963).

Les polyphosphates ont également des propriétés séquestrantes, qui permettent de les considérer comme des supports intéressants lorsqu'on envisage l'addition d'oligo-éléments aux engrais liquides, ce qui a été vérifié dans le cas du zinc (CARPENTIER, 1969). Par contre, le fer ainsi apporté, bien que restant soluble même en présence d'une grande quantité de calcaire, n'est pas absorbé par les racines de vigne et n'a pas de valeur antichlorosante (JUSTE *et al.*, 1968). Les polyphosphates de manganèse ne sont efficaces qu'à doses très élevées (COPPENET, 1968).

b) *Produits peu solubles.*

L'utilisation de produits peu solubles repose sur l'hypothèse que les racines trouveraient à leur contact plus d'ions nutritifs qu'auprès des particules du sol ayant fixé ces ions en provenance de sels solubles. En procurant une alimentation soutenue, ils éviteraient les risques de toxicité. Les expériences effectuées dans ce sens n'ont cependant pas été toujours très encourageantes. C'est ainsi qu'en terres humifères de la Région parisienne, un carbonate manganeux, dont la solubilité aqueuse est de l'ordre de 4 mg Mn par l, c'est-à-dire déjà relativement élevée mais beaucoup moins que celle d'un sulfate, s'est montré aussi peu efficace à doses égales que ce dernier (TROCMÉ *et al.*, 1950). Des oxydes de manganèse hydratés (acerdèse, manganite manganeux, bioxyde de manganèse hydraté fraîchement préparé), expérimentés à la suite des travaux de JONES et LEEPER (1951), se sont révélés un peu plus efficaces que le sulfate en ce sens que leur efficacité à dose très élevée était suivie d'une certaine arrière-action positive que n'avait pas le sulfate ; mais cette

arrière-action était trop limitée pour justifier l'utilisation de produits de cette nature (TROCMÉ, 1954).

L'emploi de verres frittés finement moulus renfermant les divers oligo-éléments nécessaires aux plantes n'a pas donné de résultats positifs dans trois cas où la lutte contre les carences s'avère difficile par apport d'oligo-éléments au sol : chlorose ferrique en sol calcaire, carence en manganèse en milieux humifères non acides, carence en zinc du lin en sols de limon non acides riches en phosphore. Cela ne veut pas dire que ces produits n'auraient pas été efficaces dans d'autres situations, notamment en sols légers, où ils permettraient en outre de limiter les pertes par entraînement en profondeur. La question se poserait alors de préciser leur intérêt par rapport aux autres techniques déjà employées ; aux Pays-Bas, les travaux sur l'utilisation agricole de produits frittés renfermant du cuivre ou du manganèse ne semblent pas avoir conclu favorablement à ce sujet (HENKENS et SMILDE, 1966-67).

C'est sans doute avec le cuivre, notamment lorsqu'il y a lieu de créer une large provision en sols pauvres, que l'on a obtenu le plus souvent des résultats intéressants avec des produits autres que des sels minéraux et économiquement utilisables. STEENBJERG et BOKEN (1950) avaient montré l'efficacité d'oxydes cuivriques finement pulvérisés pour le traitement des carences en cuivre au Danemark. Il s'agit sans doute de produits encore relativement solubles (la solubilité aqueuse des oxydes cuivriques est de l'ordre de 1 mg par l, PASCAL, 1957). Les scories dites cuivreuses sont parfois utilisées pour combattre les carences en cuivre et fournissent également du zinc et du cobalt.

L'ensemble de ces observations conduit à une certaine prudence dans l'estimation de la valeur des oligo-éléments dans certains engrais ou amendements.

En conclusion, l'alimentation des cultures par application au sol de produits renfermant des oligo-éléments est un problème qui est suffisamment mal résolu dans un certain nombre de cas pour qu'on préfère alors l'emploi de pulvérisations ou de poudrages sur les parties aériennes. Mis à part les cas de chlorose, ces procédés se montrent en général efficaces et particulièrement intéressants s'ils sont combinés à un autre traitement (herbicide sur céréales, insecticide sur lin, etc.). Mais ils demandent souvent à être renouvelés. D'autre part, on peut admettre que les pulvérisations, qui ne sont réalisables qu'une fois atteint un certain développement des plantes, risquent d'arriver trop tard pour compenser une insuffisance initiale d'alimentation, ou que certains éléments seront plus mobiles et plus utilisables par la plante s'ils sont absorbés par les racines (cas du fer notamment, sans doute par suite de transports sous formes chélatées, HELLER, 1964), ou encore que l'alimentation ainsi réalisée par les parties aériennes risque d'être moins efficace parce que plus brutale et moins soutenue. En fait, on ne dispose pas d'expériences concluantes permettant de considérer que les résultats ainsi obtenus soient équivalents à ceux qu'assurerait une alimentation convenable au niveau des racines.

### 2. — *Action des oligo-éléments sur le rendement ou la qualité des récoltes*

Lorsque l'application d'oligo-éléments — ou la mise en œuvre d'une technique culturale appropriée — a pour but de combattre une carence se manifestant par des symptômes pathologiques visibles, il en résulte en général des augmentations de

rendement des récoltes, d'importance variable, mais parfois considérables (divers exemples sont présentés plus loin dans les études régionales) ; la composition minérale et organique des produits récoltés subit également des variations notables (COIC et COPPENET, 1956 ; DECAU et LAMAZOU-BETBEDER, 1964). Mais il arrive aussi que les manifestations de carence n'apparaissent qu'à des stades de développement avancés et que les rendements soient alors peu affectés (COPPENET, 1952, 1956).

L'action des oligo-éléments doit aussi être envisagée en l'absence de tout symptôme visible de carence. Elle peut alors concerner l'augmentation de la teneur en oligo-éléments des aliments, en particulier des fourrages (ce point est étudié plus loin par Mme PÉRIGAUD : *les carences en oligo-éléments des ruminants en France*), ou, de façon générale, l'accroissement des rendements ou de la qualité des récoltes.

Ce problème des « subcarences », comme l'on dit souvent actuellement, auquel se rattache celui des « prétoxicités », a retenu l'attention des agronomes depuis longtemps. Déjà, en 1905, Gabriel BERTRAND faisait état d'augmentations de rendements de 22,5 p. 100 chez une avoine après apport de 50 kg de sulfate de manganèse par ha. On peut penser que les expériences culturales effectuées à partir de 1939 à l'instigation de BURGEVIN dans des terrains quelconques, rappelées plus haut par COPPENET, cherchaient à fournir des éléments de réponse à ce problème. A la même époque, parallèlement à ces essais systématiques d'après lesquels il n'y avait guère de résultats positifs à attendre des oligo-éléments dans les conditions d'emploi préconisées, d'autres expérimentations avaient déjà permis de considérer que les oligo-éléments agissaient parfois même en l'absence de symptômes de carence.

Ainsi THÉROND (1934) signalait avoir obtenu en culture maraîchère (poireaux, petits pois) des augmentations de rendements allant de 3 à 7 p. 100 après arrosages avec des solutions de sulfate de manganèse ; JORET et MALTERRE (1935) faisaient passer le rendement des pommes de terre de 18 à 23 tonnes à l'ha par apport de 4 kg de borax en sols calcaires ; LAVOLLAY (1942) enregistrait des augmentations de rendement de 15 p. 100 sur haricots après application de molybdène. Beaucoup d'autres essais analogues restaient cependant sans résultats positifs.

BRIOUX et JOUIS (1934), dans des essais en plein champ sur pommes de terre ayant reçu du fumier, ajoutaient aux engrais azotés, phosphatés et potassiques 15 kg de sulfate de manganèse, 15 kg de borate de soude, 10 kg de sulfate de cuivre par ha (3 répétitions). Il n'en résultait aucune différence de rendements, mais la teneur en fécule augmentait significativement de 14,6 à 15,1 p. 100 et la teneur en matière sèche de 19,3 à 20,2 p. 100. Sur betteraves, avec des doses du même ordre (4 répétitions), la teneur en sucre passait de 13,7 à 14,1, sans augmentation des rendements. Les auteurs concluaient : « En cette période de surproduction (1934), c'est une question qu'il serait intéressant d'approfondir, la qualité prenant une importance égale à celle du rendement brut. »

Ainsi, avant même que l'on portât beaucoup d'attention aux symptômes de carence, puisqu'on ne connaissait guère à l'époque que la chlorose des arbres fruitiers et de la vigne, la maladie du cœur de la betterave et le liège des pommes, on s'intéressait au problème plus général de l'action des oligo-éléments sur la croissance et la composition des végétaux.

Divers travaux ont été poursuivis ces dernières années sur ces questions. Nous en indiquerons quelques-uns, sans cependant être à même de les reprendre tous.

a) *Essais en alimentation contrôlée.*

Dans des essais portant sur des cultures successives de jeunes tomates alimentées par solutions coulantes (CHABANNES et BARBIER, 1954 ; BARBIER et CHABANNES, 1955), l'augmentation du taux de bore dans la solution a donné des suppléments ou des déficits de récolte considérables en l'absence de tout symptôme pathologique de carence ou de toxicité (tabl. 4). L'expérience met également en évidence la difficulté de l'expérimentation en ce domaine : non seulement on est passé rapidement de la dose optimale à des doses dépressives, lesquelles s'étendaient sur une gamme étendue sans provoquer de symptômes visibles de toxicité, mais en outre la dose optimale a varié selon les périodes de l'année où étaient effectués les essais successifs (la croissance a été plus lente dans les dernières expériences).

TABLEAU 4

*Action du bore en l'absence de symptômes de carence*

(d'après J. CHABANNES et G. BARBIER, 1954)

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1e série (juin) | millimol B/l de solution nutritive | (0, ou impuretés) | 0,005 | 0,01 | 0,03 | 0,1 | |
| | g matière sèche récoltée | 31,1 | 83,6 | 66,3 | 53,5 | 71 | |
| | Symptômes pathologiques | + | — | — | — | — | |
| 2e série (août-septembre) | millimol B/l de solution nutritive | 0 | 0,000 5 | 0,001 | 0,002 5 | 0,005 | 0,01 |
| | g matière sèche récoltée | 5,0 | 6,9 | 8,5 | 20,5 | 27,8 | 31,3 |
| | Symptômes pathologiques | + | + | ± | — | — | — |
| 3e série (octobre) | millimol B/l de solution nutritive | 0,000 75 | 0,001 | 0,0015 | 0,002 | 0,003 | 0,005 |
| | g matière sèche récoltée | 1,06 | 0,92 | 0,72 | 0,77 | 0,77 | 0,75 |
| | Symptômes pathologiques | — | — | — | — | — | — |

Dans des essais en pots avec addition de cuivre à doses croissantes, on a observé des effets dépressifs sans symptômes caractéristiques de toxicité, pour diverses espèces (lupin, maïs, haricots, tomates, DROUINEAU et MAZOYER, 1962).

La notion de dose optimale, encadrée par des doses de subcarence et de prétoxicité (ou d'optimum de concentration nutritive, G. BERTRAND, 1931) a souvent été soulignée à la suite des nombreuses expériences au champ effectuées par D. BERTRAND (1963 et années suivantes) avec un grand nombre d'oligo-éléments.

b) *Essais effectués en conditions très diverses* pour essayer de situer l'importance et l'intérêt du problème. Des expériences culturales ont été réalisées pendant plusieurs années consécutives par l'Institut technique de la Betterave (1958 à 1962) en liaison avec l'I. N. R. A. Elles mettaient en comparaison les rendements et la teneur en sucre de betteraves ayant reçu ou non, en application au sol, des doses variables d'oligo-éléments (associés occasionnellement à du magnésium). Certains effets positifs limités ont été parfois constatés (avec ou sans magnésium), mais en général il n'y avait aucune action significative.

c) *Essais sur espèces particulièrement sensibles à une carence déterminée, sans tenir compte des conditions de milieu.*

Des pulvérisations de molybdate en solution à 4 doses différentes, sur pois n'ayant que quelques cm de hauteur, n'ont pas modifié les rendements, dans des essais effectués simultanément, une seule année, par les stations d'agronomie d'Auxerre, Dijon, Quimper, Toulouse, Versailles (tabl. 5, MAURICE et TROCMÉ, 1963).

Dans la Région nantaise, des apports de molybdène en pulvérisation sur melon, plante très sensible à la carence en cet élément, sont restés sans effet, quelle que fût la dose appliquée (TROCMÉ, 1964).

TABLEAU 5

*Influence de pulvérisations de molybdate d'ammonium sur pois en 5 situations différentes*
(en indices de comparaison par rapport au témoin sans molybdate = 100)

| Molybdate en g/ha | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 200 | 99,6 | 108 | 89,0 | 99,3 | 111,1 |
| 400 | 104,9 | 98 | 97,2 | 100,3 | 104,1 |
| 1 200 | 100,0 | 108 | 90,7 | 105,2 | 91,0 |
| 2 400 | 97,0 | 105 | 87,6 | 102,9 | 111,1 |

pas de différences significatives.

Sur luzerne, des applications de bore en solution après chaque coupe ont donné, sur 6 coupes, un résultat positif significatif (111 p. 100 du témoin), un résultat négatif significatif (96,5 p. 100 du témoin). Au total, aucune action nette (Station d'agronomie de Dijon, résultats non publiés).

Par contre, en culture fruitière, on a pu observer de meilleures mises à fruits après pulvérisations de bore pendant la nouaison (BOUHIER de l'ÉCLUSE, 1961). En sol léger et humifère soumis à la culture maraîchère, le poids moyen des choux fleurs est passé de 2,1 kg à 3,2 kg avec 20 kg de borax par ha, et à 2,9 kg avec 50 kg (CHABANNES, 1955).

d) *Essais effectués dans des conditions de milieu voisines de celles où se manifestent des carences.*

Sur les cultures légumières en terrains d'épandage, les applications de manganèse effectuées avec succès sur plantes carencées n'ont eu aucune action en l'absence de symptômes (TROCMÉ, 1952). En Bretagne, les pommes de terre ne réagissent pas aux applications de sulfate de manganèse utilisées dans les mêmes conditions sur avoines carencées (COPPENET et VOIX, 1951). JORET et MALTERRE avaient déjà signalé en 1936 que le bore, très efficace les années où sévissait la pourriture du cœur de la betterave, pouvait aux mêmes doses n'avoir aucune action ou même être légèrement dépressif en l'absence de cette maladie.

Par contre en Sologne, sur terres légères un peu acides où les navets présentent

de graves symptômes de carences en bore, l'application de 25 kg de borax a donné lieu, pendant 3 années consécutives, à des augmentations moyennes de 20 p. 100 du rendement des pommes de terre (BRIANT et TROCMÉ, 1960). Sur betteraves, des augmentations de rendement de l'ordre de 5 p. 100 avaient été aussi parfois observées en Sologne, à la suite de l'application de divers oligo-éléments, uniquement après chaulage (DEPARDON et BURON, 1957, 1958).

Dans des conditions analogues à celles où apparaissent des carences zinciques, la richesse en lin teillé a augmenté de 6 p. 100, de façon hautement significative, après apport d'un produit commercial renfermant divers oligo-éléments, mais l'action est restée nulle dans un autre essai de même type (HERMANT, 1967). Des essais antérieurs avaient parfois mis en évidence des effets positifs du zinc, appliqué de diverses façons, sur la longueur et la qualité des fibres de lin, sans qu'il y eût d'action dépressive (FERNANDEZ et TROCMÉ, 1963 ; JOUIS, 1964).

e) *Essais sur espèces sensibles, dans des conditions susceptibles de créer des insuffisances.*

Pendant 3 années consécutives (1967-68-69), on a déterminé dans des situations diverses l'influence de pulvérisations de sulfate de zinc sur le rendement du maïs, en sols non acides bien pourvus en acide phosphorique. Les pulvérisations étaient effectuées, selon un protocole identique, à 2 ou 3 reprises à partir du stade 4/5 feuilles, à la concentration de 1,5 p. 100 de sulfate de zinc + 1 p. 100 de chaux éteinte, comme préconisé pour le traitement des carences (DARTIGUES et LUBET, 1968). Les rendements en grain étaient comparés à ceux de témoins n'ayant pas reçu de sulfate de zinc ni de bouillie calcique, avec 5 ou 6 répétitions de chaque traitement. Les résultats (1) sont donnés au tableau 6. Il apparaît que :

TABLEAU 6

*Rendements en grain après pulvérisations de sulfate de zinc sur maïs*
(Témoins sans zinc = 100)

| | Blois (1) | | | | | Rouen (2) | Chartres (3) | Versailles (3) | Avignon (4) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1967 | 101,7 | | | | | 110,3 | 96,2 | 94,7 | 104,9 | 104,2 |
| 1968 | 102,1 | 102,8 | 102,9 (*) | 103,2 | 103,8 * | | | 93,0 * | 102,5 | |
| 1969 | 93,0 | 97,6 | 100,2 | 100,8 | | | | | | |

(1) Limons sur calcaires de Beauce ou rendzines. Var. *I. N. R. A. 258.*
(2) Alluvions calcaires. Var. *I. N. R. A. 258.*
(3) Limons des plateaux. Var. *I. N. R. A. 258.*
(4) Sols bruns légèrement calcaires. Var. *I. N. R. A. 300, 260* et *680.*
* Significatif à $P < 0,05$.

— 2 essais sur 17 ont été significatifs en faveur du sulfate de zinc, sans cependant que l'augmentation de rendement soit très importante (d'ailleurs, même quand les témoins présentent des symptômes de carence, les augmentations de rendement

(1) Non précédemment publiés.

sur maïs n'excèdent parfois pas 5 p. 100. On n'a eu d'effet dépressif significatif que pour un essai, lorsque la récolte a été effectuée trop tardivement ;

— l'action du zinc est significative pour l'ensemble des 5 essais effectués en 1968 par la station de Blois (P. BURON) dans des conditions comparables ;

— en 1969, dans la même région, cette action positive ne se manifeste pas. Les rendements moyens par ha, sans zinc, ont varié, selon les situations, de 42 à 57 q de grains à 15 p. 100 d'humidité, alors qu'en 1968, ils allaient de 77 à 87 q. On peut concevoir que l'apport de zinc n'a eu d'effet que lorsque les conditions de productivité étaient favorables et les besoins élevés ;

— l'effet positif ne s'est pas manifesté plus particulièrement dans les sols d'extrême richesse en acide phosphorique (allant jusqu'à 0,78 p. 1 000 $P_2O_5$ assimilable, méthode citrique) ; mais dans les quelques essais de même type en sols pauvres en phosphore, on n'a jamais enregistré d'action positive.

En définitive, il semble que, au moins dans certaines conditions, l'apport de zinc sur maïs se montre utile, encore que l'action sur les rendements soit restée limitée dans nos essais. On peut cependant faire les remarques suivantes, en accord avec les observations faites dans des régions où apparaissent, sporadiquement et certaines années, des carences en zinc sur maïs (entre Étampes et Orléans) :

— le sulfate de zinc en application dans le sol, à des doses de 50 ou 75 kg par ha ($SO_4Zn$, 7 $H_2O$) aurait pu être plus efficace que les pulvérisations ;

— il aurait été utile de contrôler dans quelle mesure, même sans effet sur les rendements, le zinc n'avait pas une action favorable en hâtant la maturation du grain, ou en améliorant certains caractères de qualité.

L'ensemble des travaux signalés relève essentiellement de l'expérimentation culturale. Diverses critiques pourraient être présentées à leur sujet. En particulier, les résultats auraient peut-être été plus caractérisés, ou différents, si les apports d'oligo-éléments n'avaient été les mêmes en général que ceux conseillés pour combattre les carences ; cependant, comme on a rarement enregistré alors d'actions dépressives, il semble qu'ils se situaient à l'intérieur de limites raisonnables, même s'ils ne permettaient pas de caractériser l'alimentation optimale. Quoi qu'il en soit, on peut proposer les conclusions suivantes :

— il semble que, dans la majorité des situations, il n'y ait pas de subcarences ou de prétoxicités, ou qu'en tout cas, leur incidence soit trop limitée pour être facilement mise en évidence par l'expérimentation agronomique ;

— bien qu'on ait mis en évidence des subcarences, et plus rarement des prétoxicités, on ne dispose pas actuellement de données convenables pour caractériser avec certitude les facteurs dont elles dépendent, et prévoir leur manifestation ;

— les subcarences ont été le plus souvent observées dans des conditions voisines de celles provoquant des carences et sur des espèces sensibles à ces maladies ;

— il arrive souvent que sur l'étendue d'un même champ, il existe à la fois des zones carencées et des zones d'aspect sain (irrégularité des épandages d'amendements, profondeurs de sols différentes, etc.). L'application du traitement contre la carence à l'ensemble du champ peut être favorable aux plantes des parties non visiblement carencées, et semble ne devoir être que rarement dépressive. De même,

une application systématique là où les carences apparaissent irrégulièrement selon les années risque d'être bénéfique même les années où les carences n'apparaissent pas. Et s'il y a risque d'effet dépressif, comme dans le cas d'applications de bore sur betteraves signalé plus haut, il est largement compensé par l'effet favorable lorsqu'il y a carences.

L'étude des subcarences mérite certainement d'être poursuivie, d'autant plus qu'elles ont été parfois signalées à l'étranger sur des terroirs étendus, en relation avec certains caractères pédoclimatiques (cuivre dans la région Weser-Ems, Allemagne de l'Ouest, VETTER et TEICHMANN, 1968). Cette étude sera facilitée par l'amélioration des techniques d'analyses, ou la mise en œuvre de nouvelles méthodes, telles que la prospection géochimique avec établissement de cartes prévisionnelles permettant le choix d'emplacements adéquats pour la mise en place d'essais destinés à approfondir ces phénomènes (PÉDRO, 1968). Toutefois, l'ensemble des considérations présentées dans cet article aura souligné les difficultés que l'on rencontre pour aborder des problèmes de cette nature.

*Reçu pour publication en juin 1970.*

## SUMMARY

### EFFECTS OF FERTILIZERS AND OF VARIOUS METHODS OF CULTIVATION ON THE FEEDING OF PLANTS WITH TRACE ELEMENTS

In practical agriculture and horticulture, whether there are or are not deficiencies or excesses of trace elements often and sometimes mainly depends on the diverse methods of cultivation used. Various observations are presented on this subject, concerning the use of lime or organic ameliorators, chemical fertilizers and pesticides, irrigation, aeration and the management of the soil, steam sterilization, choice of species and varieties, and timing of steps in cultivation. An example of the combined action of a series of factors is put forward, in relation to methods of soil management in fruit growing.

The question of the effect of the systematic use of trace elements in soil fertilization is studied, notably by discussing the effectiveness of various forms (complexes, and slightly-soluble compounds) and the action of oligo-elements on yield or quality of the crops in the event of sub-deficiencies or of pre-toxicités.

## ZUSAMMENFASSUNG

### EINFLUSS DER FRUCHTBARMACHUNG SOWIE VERSCHIEDENER TECHNISCHER ANBAUVERFAHREN AUF DIE ERNÄHRUNG DER PLANZEN MIT SPURENELEMENTEN

Die Gegenwart oder Abwesenheit von unzureichenden oder übermässigen Mengen von Spurenelementen in der Ackerbau oder Gartenpraxis, stehen häufig in Beziehung, manchmal in ausschlaggebender Weise, mit den verschiedenen Formen der angewandten Anbautechnik. Dafür werden verschiedentlich gemachte Beobachtungen angegeben, insbesondere über kalkzuführende und organische Meliorationen, Kunstdünger und Pestiziden, Bewässerung, Belüftung und Setzung der Böden, Dampfsterilisierung, Auswahl der Arten und Sorten sowie Anbauzeiträume. Es wird ein Beispiel für die Gesamteinwirkung einer Reihe von Faktoren auf die Unter haltsweise des Bodens einer Obstbauzucht vorgeschlagen.

Die Frage über den Einfluss der systematischen Verwendung von Spurenelementen in

der Fruchtbarmachung wird untersucht durch Erörterung der Wirksamkeit gewisser Formen (Komplexbildungen, schwer lösliche Produkte) und der Einwirkung der Mikronährstoffe auf den Ertrag oder die Güte der Ernten im Falle von möglichen Subkarenzen oder Prätoxizitäten.

## РЕЗЮМЕ

*Влияние удобрения и различных приемов культивирования на питание растений микроелементами.*

С. ТРОКМЭ.

В сельскохозяйственной и садовой практике присутсвие или отсутствие, недостаточности или избытка микроелементов в почве, часто, и иногда даже очень тесно, связанны с техническими приемами применяемыми для различных культур. В данном труде автор представляет результаты некоторых наблюдений над применением почво-улучшающих известковых и органических средств, химических удобрений, пестицидов, орошения, продувания, и оседания почвы, паровой ее стерилизации, и выбором видов, сортов и периодов культуры. Он предлагает также пример общего действия всей совокупности факторов, пример по поводу способов ухода за почвой во фруктовом садоводстве.

Рассматривается также вопрос влияния систематического применения микроелементов в удобрении и обсуждается эффективность их некоторых форм (комплексные, плохо растворимые); а также действие микроелементов на урожайность и качество урожая при состояниях пред-недостаточности и суб-токсичности.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BADOUR C., LÉVY J.-F., 1964. Identification et traitement de carences en manganèse sur vigne en Champagne. *1er Colloque sur le Contrôle de la Fertilisation minérale.* Montpellier, 165-166.

BARBIER G., 1938. Conditions et modalités de la fixation de l'hydrate ferrique colloïdal par l'argile des sols. *Ann. agron.*, **8**, 34-43.

BARBIER G., CHABANNES J., TROCMÉ S., 1950. Sur un dépérissement de vergers aux environs d'Orléans. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 517-520.

BARBIER G., CHABANNES J., 1953. Contribution à l'étude du bore dans le sol et dans les plantes. *Ann. agron.*, **4**, 27-44.

BARBIER G., CHABANNES J., 1955. Sur la rétention du bore dans le sol et ses conséquences agronomiques. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 259-263.

BASTISSE E.-M., 1962. Rôle vecteur de divers anions minéraux ou organiques dans les phénomènes géochimiques et physiologiques. *Ann. agron.*, **13**, 379-389.

BELLANGER J., LAMAND M., PÉRIGAUD S., 1970. La carence en cuivre chez les ruminants. *Ann. Nutrit. Alim.*, **24**, 1-62.

BERTRAND D., 1963 et suiv. *C. R. Acad. Sci.* et *C. R. Acad. Agric. Fr.*

BERTRAND G., 1905. Sur l'emploi favorable du manganèse comme engrais. *C. R. Acad. Sci.*, **141**, 1255-1257.

BERTRAND G., 1931. *Szeitz. f. angew. Chem.*, **44**, 917.

BERTRAND G., de WAAL H., 1936. Recherches sur la teneur comparative en bore de plantes cultivées sur le même sol. *Ann. agron.*, **6**, 537-541.

BLANC-AICARD D., DROUINEAU G., 1955. Capacité de saturation en calcium et résistance à la chlorose. *C. R. Acad. Sci.*, **241**, 1614.

BOISCHOT P., PULBY J.-F., 1966. Évolution de l'industrie des engrais phosphatés. *Bull. Ass. Fr. Ét. Sol*, **3**, 105-114.

BOUHIER de l'ÉCLUSE R., 1961. Magnésie et oligo-éléments en arboriculture fruitière. *Bull.* B. E. S. T., **6**, 2-5.

BRIANT A., TROCMÉ S., 1960. Essais d'oligo-éléments sur pommes de terre. *C. R. des travaux stations agron.*, 12V-14V.

BRIOUX C., JOUIS E., 1934. Action des éléments accessoires sur la végétation. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 257-264.

BURGEVIN H., FOEX E., 1937. La maladie du cœur de la betterave. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 195-197.

CARPENTIER L.-J., 1969. Nouvelles formes de phosphates et leur utilisation en agriculture. *Bull. Ass. Fr. Ét. Sol*, **4**, 33-39.

CHABANNES J., 1955. Action utile du bore sur les plantes cultivées, en l'absence de symptômes de carence. *28e Congr. Chim. Indust.*, Madrid.

CHABANNES J., 1957. Le bore et le soufre des eaux de pluie en diverses stations de France. *Ann. agron.*, **8**, 727-728.

CHABANNES J., 1958. Enquête sur les conséquences éventuelles d'applications répétées de borate aux terres cultivées. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 440-445.

CHABANNES J., BARBIER G., 1954. Action utile du bore en l'absence de symptômes de carence. *Ann. agron.* (5), 848-851.

CHABANNES J., DUPRAT A., TROCMÉ S., 1958. Observations sur le traitement de la chlorose des poiriers. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 46-50.

CHABANNES J., HERVO S., 1964. Le bore dans les gadoues de la ville de Paris. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 216-218.

COÏC Y., COPPENET M., 1958. Sur la carence en manganèse des céréales dans les sols humifères de Bretagne. *Ann. Physiol. vég.*, suppl. II, 111-138.

COPPENET M., 1952. Carence en manganèse sur d'autres plantes que les céréales en Bretagne. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 193-195.

COPPENET M., 1956. En Bretagne, deux oligo-éléments d'importance. *Bull. Tech. Inform.*, **108**, 155-163.

COPPENET M., 1959. Le manganèse dans les sols de Bretagne et ses relations avec la croissance des végétaux. *Ann. agron.*, **10**, 155-218.

COPPENET M., 1968. Les oligo-éléments. *Bull. Techn. Inform.*, **231**, 595-608.

COPPENET M., DUVAL L., 1965. Détection de carences en zinc sur maïs dans le Finistère. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 449-456.

COPPENET M., VOIX S., 1951. Arrière-action des fumures manganeuses et manganèse du sol réductible par l'hydroquinone. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 67-69.

CORNILLON P., 1967. Observations sur les possibilités de solubilisation du bore dans le sol. *Sci. Sol*, **1**, 81-91.

CORNILLON P., 1970. Action de diverses matières organiques sur la solubilisation du bore en sol calcaire. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, et communication personnelle.

COURPRON C., 1967. Détermination des constantes de stabilité des complexes organo-métalliques des sols. *Ann. agron.*, **18**, 623-638.

DARTIGUES A., 1964. Les déficiences en zinc chez les végétaux et leurs causes. Revue bibliographique. *Ann. agron.*, **15**, 667-691.

DARTIGUES A., LUBET E., 1967. Relation entre le pH du sol et la manifestation de la carence en zinc du maïs dans un secteur du bassin de l'Adour ; possibilités et limites d'un diagnostic par l'analyse du sol. *Ann. agron.*, **18**, 285-299.

DARTIGUES A., LUBET E., 1968. Résultats d'expérimentations culturales sur la carence et la toxicité du zinc dans quelques sols du Sud-Ouest. *Bull. Ass. Fr. Et. Sol*, **5**, 19-31.

DECAU J., LAMAZOU-BETBEDER M., 1964. Étude des effets de la fertilisation boratée des vignes carencées en bore sur la vinification et sur la composition minérale des vins. *Ann. Technol. agric.*, **13**, 19-29.

DELAS J., 1967. Liaisons entre cuivre et matière organique dans un podzol développé sur sable des Landes et accidentellement enrichi en cuivre. *Ann. agron.*, **18**, 17-29.

DELMAS H., 1953. Sur un cas de dépérissement des pommiers dans la haute vallée du Tech. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 473-476.

DELMAS H., 1955. Le dépérissement des cerisiers dans la région de Céret. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 333-337.

DELMAS J., BATS J., MARÉNAUD C., 1958. Étude sur le rôle du phosphore dans la nutrition de pêchers en solution nutritive. *Ann. agron.*, **9**, 334-335.

DEMOLON A., BASTISSE E.-M., 1944. Rôle vecteur de la silice dans les phénomènes géochimiques et physiologiques. Application au traitement de la chlorose ferrique. *Ann. agron.*, **14**, 265-296.

DEPARDON L., BURON P., 1957, 1958. Action de la magnésie et d'oligo-éléments sur betteraves en Sologne. *Ann. agron.*, **8**, 732-733 ; **9**, 411-412.

DROUINEAU G., MAZOYER R., 1962. Contribution à l'étude de la toxicité du cuivre dans les sols. *Ann. agron.*, **13**, 31-53.

DUVAL L., 1966. Les amendements humiques et calcaires d'origine marine. *Bull. Mayenne Sciences*, 58-64.

EATON F., 1935. Boron in soils and irrigation waters and its effects on plants. *U. S. Dept. Agric. Tech. Bul.*, **448**, 131 p.

EMGE R., LINN M., 1952. Effect of spraying with Zinebe on the growth and zinc content of tomato plant. *Phytopathology*, **42**, 133-136.

FERNANDEZ M., TROCMÉ S., 1963. Essais d'oligo-éléments sur lin à fibre. *C. R. d'activité, A. G. P. L.*, **11**.

FIORAMONTI S., MARTY J., 1960. Éléments minéraux dans le compost fabriqué à partir des ordures ménagères de la ville de Toulouse. *Bull. Ass. Fr. Ét. Sol*, **9**, 431-438.

FLON H., 1966. Les incidences de l'évolution de la composition des ordures ménagères sur le compostage. *Techn. et Sc. municip.*, **61**, 65-87.

GASSER R., MULLER G., 1956. Les traitements contre la chlorose. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 713-717.

GOUNY P., MAZOYER R., 1953. Relations entre la nutrition minérale et les symptômes pathologiques dans la chlorose calcaire. *Ann. agron.*, **4**, 561-598.

GOUNY P., MEYNADIER I., DUCAILAR G., 1963. Possibilités d'utilisation des scories de déphosphoration dans les sols riches en manganèse. *C. R. des travaux stations agron.*, 11 D.

GRAS R., 1965. Premiers résultats d'un essai d'entretien du sol en arboriculture fruitière. Action sur les propriétés physiques du sol. *Ann. agron.*, **16**, 663-700.

GUENNELON R., 1962. Les chélates de fer dans le traitement de la chlorose du poirier. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 209-213.

GUÉRILLOT-VINET A., GUÉRILLOT J., BAZIER R., MANSUY J., 1961. Influence des engrais minéraux et du fumier sur quelques constituants du blé et de la carotte. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 175-181.

HALIM A., WASSOM C., ELLIS R. Jr, 1968. Zinc deficiency symptoms and zinc and phosphorus interactions in several strains of corn. *Agron. J.*, **60** (3), 267-271.

HELLER R., 1964. Chélation et nutrition végétale. *Plant analysis and fertilizer problems*, **4**, 130-144.

HENKENS C., SMILDE K., 1966 et 1967. Evaluation of glassy frits as micronutrient fertilizers. I. Copper and molybdenum frits. II. Manganese frits. *Neth. J. Agric. Sci.*, **14**, 165-177 et **15**, 21-30.

HERMANT P., 1967. Épandage d'oligo-éléments. *C. R. d'activité A. G. P. L.*, 8.

JONES L., LEEPER G., 1951. The availability of various manganese oxides to plants. *Plant and Soil*, **3**, 141-153.

JORET G., MALTERRE H., 1935 et 1936. Action du bore. *Recherches sur la fertilisation*, 120-121 et 141.

JOUIS E., 1964. Emploi du zinc sur lin. *C. R. des travaux stations agron.*, 22 Q.

JOUIS E., 1968. La pluie fertilisante en Seine-Maritime. *Union agricole*, 3.

JOUIS E., HANGARD E., 1957. La composition des fumiers français. *Ann. agron.*, **8**, 903-942.

JUNGERMANN K., 1960. Beiträge zur Mikronährtoff-Frage. *Landw. Forsch.*, **13**, 153-167.

JUSTE C., DELAS J., 1967. Influence de l'addition d'aluminium, de fer, de calcium, de magnésium ou de cuivre sur la mobilité électrophorétique, le spectre d'absorption infrarouge et la solubilité d'un composé humique. *Ann. agron.*, **18**, 403-427.

JUSTE C., DELMAS J., LASSERRE M., 1961. Comparaison de la rémanence de sels de fer et de séquestrats. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 168-171.

JUSTE C., SINGH Y., DARTIGUES A., COURPRON C., 1968. Comparaison de l'efficacité d'engrais liquides à base de polyphosphates ou d'orthophosphate d'ammonium. *VI^e Congr. Mond. des Fertilisants* (Lisbonne, 15-19 octobre 1968).

LAFON J., COUILLAUD P., GAY-BELLILE F., 1965. Essais de chélate de fer dans la lutte contre la chlorose de la vigne. *Le Paysan français*, **565**, 14-17.

LAURENT J., 1962. Utilisation de chélates de fer dans la lutte contre la chlorose des arbres fruitiers. *92^e Congr. Pomologique*, 99-107.

LAVOLLAY J., 1942. Un essai d'engrais molybdique pour la culture du haricot sur un sol en place. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 353-354.

MAROGER M., 1952. Étude de dépérissements de rosiers des forceries de la Brie. *Ann. agron.*, **3**, 548-549.

MAURICE J., TROCMÉ S., 9163. Application de molybdate d'ammonium sur pois et laitue. *C. R. travaux stations agron.*, 25 V.

MAURICE J., TROCMÉ S., 1965. Influence de l'apport d'amendements calcaires sur le bore préexistant ou ajouté dans le sol. *Ann. agron.*, **16**, 579-593.

MOLLENHAUER R., SMITH C., 1954. Tomato plant absorption and translocation of manganese and zinc from dithiocarbonate fungicide sprays. *Proc. amer. Soc. Hort. Sc.*, **63**, 297-303.

MONNIER G., 1960. *La structure du sol.* Techniques agricoles 1, fasc. 1140.

PASCAL P., 1957. *Nouveau traité de chimie minérale,* Masson éd., 3, p. 224.

PEDRO G., 1968. La prospection géochimique des éléments-traces dans les sols avec établissement de cartes géochimiques superficielles (son utilisation en métallogénie et son intérêt en agronomie). *Rapport interne Agronomie,* I. N. R. A., 71 p.

REDLICH G.-C., 1962. Les oligo-éléments, leur importance dans des techniques de production de plus en plus intensive (grande culture). *Bull. C. E. T. A.,* 687.

RIVIÈRE G., BAILHACHE G., 1913. La lutte contre la chlorose des arbres fruitiers. *J. Soc. nation. Hort. Fr.*

ROHDE G., 1961. Spurenelementanreicherung verursacht Reiselmüdigkeit. *Wasserwirt. Wassertechnik,* **11**, 542-550.

SAGLIO P., 1969. Chlorose ferrique sur orangers induite par irrigation à l'eau saumâtre dans la région de Tunis. *C. R. Acad. Agric. Fr.,* 741-750.

SINGH Y., DARTIGUES A., 1970. Efficiency of polyphosphates and orthophosphate in zinc deficient soils. *Plant and Soil.* 32, **2**, 323-326

STEENBJERG F., BOKEN E., 1950. Copper contents and copper deficiency in Danish soil types. *Plant and Soil,* **2**, 195-221.

STEKLOVA M., 1959. Investigation on the physiological effect of boron. *Trady Bot. Inst. Komarova Akad.,* **13**, 329-360.

STENUIT D., 1963. Beziehung zwischen der Phosphat Form und dem Ertrag auf Sandboden mit Mangan mangel. *Z. Pflanzenernähr.,* **100**, 42-52.

THÉROND M., 1934. Action du manganèse sur la nutrition azotée et la qualité des plantes maraîchères. *Recherches sur la fertilisation,* 114-115.

TROCMÉ S., 1952. Recherches sur le manganèse. *Ann. agron.,* **3**, 638-639.

TROCMÉ S., 1953. Les éléments autres que l'azote, le phosphore et le potassium dans la fumure. *Centre de perfectionnement technique,* Fasc. 2997., 20 p.

TROCMÉ S., 1954. Valeur fertilisante d'une substance vitrifiée renfermant des oligo-éléments. *Ann. agron.,* **5**, 851-852.

TROCMÉ S., 1961. Expérience sur l'action et l'arrière-action des engrais phosphatés. *C. R. des travaux stations agron.,* 14-17 U.

TROCMÉ S., 1963. Coloration des hortensias. *Journées d'études de l'horticulture.* F. N. P. H. P., 3-13.

TROCMÉ S., 1964. Expérience sur la fertilisation des melons au molybdène. *C. R. des travaux stations agron.,* 10 V.

TROCMÉ S., 1966. Premiers résultats d'un essai d'entretien du sol en arboriculture fruitière. Action sur la nutrition des arbres. *Ann. agron.,* **17**, 5-19.

TROCMÉ S., BARBIER G., CHABANNES J., 1950. Recherches sur la chlorose, par carence de manganèse, des cultures irriguées à l'eau d'égout. *Ann. agron.,* **1**, 663-685.

TROCMÉ S., BRIANT A., 1961. Désinfection des sols maraîchers à la vapeur. *C. R. travaux stations agron.,* 34-38 V.

TROCMÉ S., GRAS R., 1966. L'entretien du sol en arboriculture fruitière. Résultats d'un essai sur pommier. *C. R. Acad. Agric. Fr.,* 886-896.

VETTER H., TEICHMANN W., 1968. Feldversuchen mit gestaffelten Kupfer-und Stickstoff-Dungergaben in Weser-Ems. *Z. Pflanzenernähr.,* **121**, 97-111.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (5), 549-571.

# ACTIONS TOXIQUES DES OLIGO-ÉLÉMENTS

C. JUSTE

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches de Bordeaux, 33 - Pont-de-la-Maye*
*Institut national de la Recherche agronomique*

## RÉSUMÉ

Le plus souvent, les accidents imputables à un excès d'oligo-éléments sont observés dans les sols acides insuffisamment amendés (cas du manganèse et de l'aluminium) ou dans les sols dérivant de substrats géologiques particulièrement riches en certains éléments métalliques (cas du nickel, du chrome, du zinc) ; les accidents qui résultent d'applications correctives exagérées d'oligo-éléments ont surtout été observés pour le cuivre et le bore. La méthode générale de lutte qui permet de limiter presque toujours les conséquences défavorables résultant de la présence d'un oligo-élément en excès dans le sol est le relèvement du pH de ce dernier.

## I. — GÉNÉRALITÉS SUR LES CONDITIONS FAVORABLES A L'APPARITION DES TOXICITÉS INDUITES PAR UN EXCÈS D'OLIGO-ÉLÉMENTS.

Il est connu et répété que l'écart existant entre la quantité d'un oligo-élément nécessaire pour guérir une carence, et la quantité pour laquelle des effets toxiques dus à un excès de cet oligo-élément commencent à se manifester, est la plupart du temps très faible. Pourtant, il faut bien reconnaître que les cas d'intoxication provoquée par l'apport correctif exagéré d'un oligo-élément sont assez peu fréquents et, en tout cas, suffisamment limités dans l'espace pour que l'on puisse considérer comme négligeable leur incidence économique.

Il en va tout autrement quand la toxicité est imputable à la présence dans le sol de fortes concentrations en oligo-éléments, présence qui résulte soit des caractères pédologiques de ce sol, soit de l'incorporation accidentelle d'éléments toxiques contenus dans des amendements, des produits de traitements divers, ou dans des cendres provenant d'agglomérations industrielles. Dans ce cas, les surfaces intéressées

peuvent être en effet très vastes, et la recherche des causes de la toxicité et des moyens d'y remédier constitue l'énoncé de problèmes agronomiques souvent importants.

Il est cependant primordial de préciser que l'existence de fortes concentrations en un oligo-élément ne suffit généralement pas pour que des accidents de végétation se produisent ; il faut aussi que les conditions du milieu soient telles que l'élément-trace incriminé puisse se trouver à l'état ionique, ou tout au moins dans un état aussi proche que possible de l'état ionique. Or, la plupart des oligo-éléments sont des métaux polyvalents, dont le domaine d'existence à l'état ionique se situe dans la zone des pH acides à très acides : il en résulte que les probabilités d'intoxications provoquées par un excès d'oligo-éléments seront surtout grandes en sols acides.

Cette acidité du sol peut avoir plusieurs origines :

— elle peut être en premier lieu d'origine pédologique ; c'est le cas assez général des sols développés sur certains types de matériaux originellement pauvres en bases, dont le caractère acide est renforcé par l'action conjuguée du climat et de la végétation naturelle acidophile qui favorisent l'élimination des alcalins et des alcalino-terreux ; cette acidification progressive, due au milieu naturel, entraîne l'altération des silicates et des hydroxydes cristallisés, et la libération d'importantes masses d'éléments toxiques comme l'aluminium et le manganèse ;

— elle peut être aussi la conséquence de l'activité humaine :

- la culture continue des sols originellement acides ou neutres et l'utilisation systématique d'un grand nombre d'engrais minéraux entraînent une acidification, qui peut aller d'autant plus vite que les apports d'amendements calcaires ou d'autres correctifs de l'acidité auront été plus négligés. En se basant sur les travaux de PIERRE (1923), SLUIJSMANS (1966) a établi une formule qui permet de calculer les quantités de chaux qu'il est nécessaire d'ajouter à un sol pour compenser l'acidification résultant de l'utilisation de 100 kg d'un engrais donné (fig. 1).
- On sait aussi que certains traitements anticryptogamiques, et particulièrement les applications de soufre élémentaire, peuvent à la longue entraîner une acidification d'autant plus importante que le rythme des traitements est élevé et que le sol est pauvre en colloïdes organiques et minéraux : ces conditions se trouvent souvent réunies dans beaucoup de sols viticoles, notamment dans le sud-ouest de la France (POCHON et CHALVIGNAC, 1964).
- Enfin, une cause d'acidification souvent brutale des sols est l'assainissement d'anciennes zones marécageuses : la réoxydation des sulfures de fer formés au cours de la période d'anaérobiose entraîne l'apparition d'acide sulfurique à l'état libre, et donc une baisse très sensible du pH ; ce phénomène, particulièrement bien étudié par STARKEY (1966), se schématise par la réaction suivante :

$$4\,FeS_2 + 2\,H_2O + 15O_2 \rightarrow 2\,Fe_2(SO_4)_3 + 2\,H_2SO_4$$

Quelle que soit son origine, l'acidité du sol apparaît donc comme susceptible de jouer un rôle primordial dans les accidents de végétation causés par un excès d'oligo-éléments : c'est la raison pour laquelle on considère souvent que le problème particulier des toxicités en oligo-éléments n'est qu'une des composantes du problème

plus général posé par la valorisation des sols acides, et c'est aussi une des raisons qui font que les toxicités en aluminium et en manganèse revêtent une importance particulière, car elles sont presque toujours systématiquement associées à l'existence de sols acides, lesquels représentent à la surface du globe une fraction non négligeable des sols à vocation agricole.

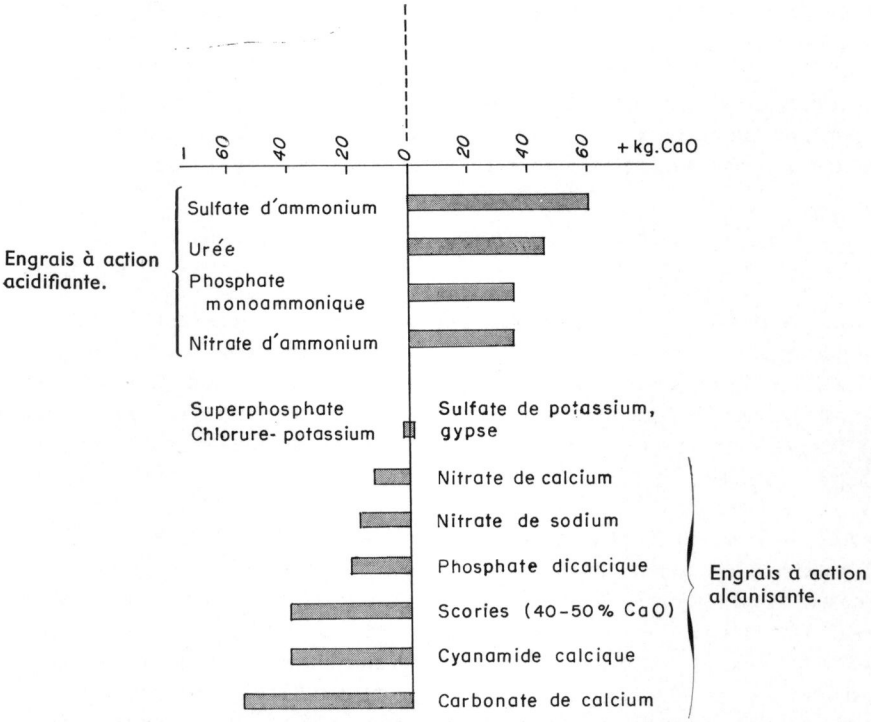



FIG. 1. — *Action alcalinisante ou acidifiante d'un certain nombre d'engrais*
(exprimée en kg de CaO à ajouter ou à retrancher à 100 kg d'engrais pour éviter toute variation du besoin en chaux initial du sol)
(D'après SLUIJSMANS, 1966)

## II. — TOXICITÉ DUE A UN EXCÈS D'ALUMINIUM

On peut se demander si l'aluminium doit être considéré comme un oligo-élément, tout au moins au sens où l'entendent les agronomes. En effet, s'il est vrai que l'on ne trouve dans les parties aériennes de la plupart des végétaux que de faibles quantités de ce métal, il n'en reste pas moins que le caractère indispensable de l'aluminium n'a jamais pu être mis en évidence de manière certaine. Les observations de SOMMER (1926), HORTENSTINE et FISKELL (1961), HACKETT (1964), CLARKSON (1965) et, plus récemment, celles de BERTRAND et de WOLF (1968), bien que mettant quelquefois en évidence un effet bénéfique de faibles concentrations en $Al^{+++}$, n'apportent pas pour autant la preuve que ce métal est nécessaire au déroulement de certains processus du métabolisme. D'après JACKSON (1967), il est fort probable que les effets favorables observés pour de faibles concentrations en $Al^{+++}$ soient des effets indirects,

liés par exemple à une action dépressive sur l'absorption d'éléments toxiques ($Cu^{++}$, $Zn^{++}$, $Mn^{++}$), ou tout simplement au maintien du pH du milieu nutritif à des valeurs convenant mieux au végétal, et cela grâce au pouvoir tampon élevé des solutions de sels d'aluminium.

Quoi qu'il en soit, il est bien certain que si l'aluminium en l'état actuel de nos connaissances, ne peut être considéré comme un oligo-élément indispensable, il ne peut non plus être classé parmi les éléments indifférents ou passifs, étant donné qu'il devient rapidement très toxique pour la plupart des végétaux quand sa concentration dans le milieu nutritif augmente : c'est en tenant compte de cette observation que l'on peut, en fin de compte, admettre le classement de l'aluminium parmi les oligo-éléments, le terme d'oligo-élément étant pris, dans ce cas, dans son sens le plus large.

### a) *Conditions particulières favorables à l'apparition de la toxicité en aluminium dans les sols*

La dynamique de $Al^{+++}$ est surtout fonction du pH ; on admet — et il a été très souvent vérifié — que pour des pH KCl N du sol supérieurs à 4,8 (pH qui correspond au seuil de précipitation des hydrates d'aluminium), l'ion aluminium ne peut exister et qu'en conséquence les probabilités de toxicité en cet élément sont nulles. Pour des pH inférieurs à 4,8, l'existence de fortes concentrations en $Al^{+++}$ est fonction du degré d'évolution du sol et de la nature et de l'importance des silicates qui entrent dans sa constitution. L'expérience montre que, pour la plupart des plantes cultivées, les risques de toxicité existent quand les teneurs en $Al^{+++}$ échangeable ($Al^{+++}$ extrait par une solution de KCl N) sont supérieures à 50 p.p.m. En fait, le diagnostic de la toxicité est moins simple à établir car il a été démontré, notamment par BROGAN (1964) et LEFÈVRE-DROUET (1967), que les composés humiques du sol peuvent fortement complexer l'aluminium et diminuer alors considérablement son action toxique ; or, il se trouve qu'une partie de cet $Al^{+++}$ complexé par les formes les plus mobiles des composés humiques est extractible par le chlorure de potassium et réagit avec l'ériochromecyanine, qui est le réactif de dosage de l'aluminium. Il en résulte que, pour certains types de sols très riches en matière organique, le seuil de toxicité doit se situer largement au-dessus de 50 p.p.m.

La présence de concentrations élevées en aluminium facilement déplaçable est, le plus souvent et notamment dans certaines régions naturelles françaises, la conséquence d'un type de pédogenèse particulier se caractérisant par l'existence de conditions d'altération intenses qui ont entraîné la destruction d'une partie du stock de silicates du sol et l'apparition de $Al^{+++}$ en position d'échange ; c'est la raison pour laquelle la toxicité en aluminium se manifeste très fréquemment dans les sols de défriche acides, insuffisamment amendés (JUSTE et HAMADI, 1963 ; JUSTE, 1965) et c'est aussi la raison pour laquelle les territoires intéressés par cette toxicité peuvent être quelquefois très vastes.

### b) *Symptômes de toxicité en aluminium*

A vrai dire, et comme pour tous les éléments dont le caractère phytotoxique est particulièrement marqué, les symptômes d'intoxication par l'aluminium sont peu caractéristiques : le symptôme essentiel est un ralentissement, voire un arrêt

complet de la croissance du végétal. Cette inhibition de la croissance, sans autre signe apparent d'intoxication, est particulièrement net chez les plantes pérennes, notamment chez les très jeunes plantules de Pin maritime (JUSTE, 1965) et chez la Vigne (DELMAS, 1967 ; VIDAL, JUSTE et MARCELLIN, 1967).

Dans le cas des plantes annuelles, nous avons pu observer, en particulier chez le Maïs, un certain nombre de symptômes rappelant des carences en azote, acide phosphorique et calcium, et aussi quelquefois des dessèchements des extrémités des feuilles les plus anciennes, qui pouvaient gagner la plante tout entière quand la concentration en $Al^{+++}$ du milieu nutritif était très élevée.

Les symptômes sur racines sont beaucoup plus caractéristiques : non seulement le développement de ces dernières est fort réduit, mais elles acquièrent une morphologie bien particulière résultant de leur absence de ramifications, de leur épaississement et de leur enroulement sur elles-mêmes (fig. 2). Ce développement très restreint du système radiculaire a des conséquences très graves, car le volume de sol exploité est réduit à sa plus simple expression et les conditions d'une malnutrition générale se trouvent alors réunies.

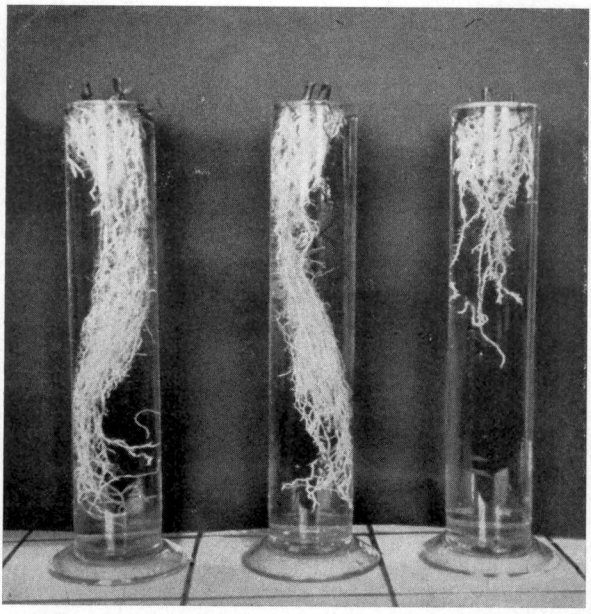


FIG. 2. — *Influence de l'aluminium sur le développement de l'appareil radiculaire de jeunes plantules de maïs cultivées sur sable*

De gauche à droite : maïs alimenté à l'aide d'une solution nutritive sans aluminium ; maïs alimenté à l'aide d'une solution contenant 10 mg de $Al^{+++}$/litre ; maïs alimenté à l'aide d'une solution contenant 50 mg de $Al^{+++}$/litre.

Cliché I. N. R. A. Station d'Agronomie C. R. B. (33)

Un très faible pourcentage de l'aluminium accumulé dans les racines parvient à migrer vers les parties aériennes du végétal, aussi est-il illusoire d'espérer baser un diagnostic d'intoxication par $Al^{+++}$ sur un dosage de cet élément dans le végétal. D'ailleurs, il est connu que certains végétaux qui s'adaptent très bien en sols riches

en aluminium mobile ont souvent la faculté d'accumuler de grandes quantités de ce métal dans leurs parties aériennes ; c'est notamment le cas du Théier (CHENERY, 1964), de plantes exotiques et de nombreux résineux (HUMPHRIES et TRUMANN, 1964), dont la bonne adaptation en sols acides est sans doute associée à leur aptitude à tolérer à la fois de fortes concentrations en $Al^{+++}$ et en $Mn^{++}$.

c) *Interactions entre certains éléments minéraux et l'aluminium chez les végétaux intoxiqués par un excès de cet élément*

Il existe une littérature fort abondante consacrée aux interactions entre aluminium et phosphore ; la plupart des travaux ayant trait à ce type d'interaction ont été motivés par le fait que la toxicité de l'aluminium entraîne souvent l'apparition de symptômes comparables à ceux d'une carence en phosphore. En fait, si l'on sait que l'excès d'aluminium peut effectivement entraîner une précipitation des phosphates sous forme de phosphates d'alumine peu ou pas solubles dans le milieu nutritif, à la surface des racines ou même à l'intérieur du végétal, on sait aussi depuis les travaux de RANDALL et VOSE (1963) que de faibles concentrations en $Al^{+++}$ peuvent, bien au contraire, stimuler l'absorption de P. Les interactions entre P et $Al^{+++}$ sont donc beaucoup plus délicates à interpréter qu'on ne l'avait cru tout d'abord.

L'aluminium peut déprimer l'absorption de $Ca^{++}$ et de $Mg^{++}$ par les végétaux ; l'inverse est également vrai, notamment pour $Mg^{++}$, à tel point que DIOS-VIDAL et BROYER (1962) ont pu montrer qu'en solution nutritive, il était possible d'annihiler l'effet toxique de l'aluminium en exagérant les apports de $Mg^{++}$. L'excès d'aluminium déprime aussi fortement l'absorption d'un certain nombre d'oligo-éléments comme le cuivre, le zinc et le manganèse : l'action particulièrement dépressive de $Al^{+++}$ sur l'absorption de $Mn^{++}$ fait que, dans les sols acides où coexistent les deux éléments, c'est surtout l'intoxication par $Al^{+++}$ qui prévaut.

Les interactions $K^{+}$-$Al^{+++}$ seraient surtout sous la dépendance de la concentration en $K^{+}$ du milieu nutritif : pour de faibles concentrations en potasse, de l'ordre de grandeur de celles qu'on peut rencontrer dans les solutions du sol, $Al^{+++}$ déprimerait l'absorption, alors que pour de fortes concentrations en $K^{+}$, il y aurait une action stimulante non moins nette, ce que nous avons pu vérifier dans le cas de plantules de maïs cultivées sur un milieu synthétique très riche en $K^{+}$ (JUSTE, 1965).

Le bouleversement profond qu'entraîne l'excès d'aluminium sur l'absorption des autres éléments minéraux est sans doute la conséquence des troubles non moins profonds que provoque ce métal sur le déroulement des principaux processus physiologiques liés à l'absorption et à l'utilisation des éléments minéraux : si l'on se réfère à la mise au point récente de NORTON (1967), certains modes d'action de $Al^{+++}$ sur ces processus ne sont pas clairement connus et un champ de recherches assez vaste demeure encore ouvert aux physiologistes dans ce domaine.

d) *Méthodes de lutte contre la toxicité en aluminium*

L'aluminium ne peut exister à l'état échangeable pour des pH (KCl N) supérieurs ou égaux à 4,8 : la méthode de lutte la plus évidente que l'on puisse préconiser est donc de chauler suffisamment le sol pour amener le pH KCl N au-dessus de 4,8.

L'expérience montre que la pratique du chaulage constitue effectivement l'une des conditions qui doit être impérativement remplie pour rendre possible la mise en valeur des sols de défriche acides très riches en aluminium échangeable. L'action souvent spectaculaire de chaulages de fond abondants dans de tels sols (JUSTE *et al.*, 1968 ; CLAIRON, 1968) s'explique en majeure partie par l'insolubilisation de l'aluminium présent. Pour la plupart de ces sols, le maintien de la fertilité acquise à la suite du chaulage de fond initial consiste à maintenir le pH à une valeur convenable par de petits chaulages d'entretien.

Une autre méthode de lutte est celle qui consiste à réserver aux sols acides les variétés d'une espèce cultivée qui sont les plus aptes à tolérer de fortes concentrations en $Al^{+++}$. De très nombreux travaux consacrés à l'étude de ces différences de sensibilité génétique du Blé, de l'Orge, de l'Avoine, à l'excès d'aluminium ont été réalisées aux États-Unis, ces dernières années (FOY *et al.*, 1967 ; MAC LEOD et JACKSON, 1967 ; KERRIDGE et KRONSTAD, 1968). Il y a là une voie qui n'est certainement pas à négliger, la sélection de variétés résistantes à l'aluminium pouvant conduire à des économies substantielles d'amendements calciques et à une limitation des conséquences défavorables — notamment l'apparition de certaines carences en oligo-éléments — qui peuvent résulter des chaulages massifs exigés par la présence de quantités considérables d'aluminium mobile dans les sols.

## III. — TOXICITÉ DUE A UN EXCÈS DE MANGANÈSE

### a) *Conditions particulières favorables à l'apparition de la toxicité en manganèse dans les sols*

Contrairement à celle de l'aluminium qui ne dépend que du pH, la mobilité du manganèse est à la fois fonction du pH, du potentiel d'oxydo-réduction et du degré d'hydratation des sols. Dans une certaine mesure, le comportement de cet élément serait donc assez proche de celui du fer ; en fait, si le manganèse est plus facilement réductible que le fer, il est aussi beaucoup plus difficilement oxydable, ce qui fait que la dynamique de ces deux éléments dans le sol est en définitive fort différente, le manganèse étant beaucoup plus mobile que le fer (BÉTRÉMIEUX, 1951).

L'un des facteurs qui favorise le mieux l'apparition de quantités importantes de manganèse mobile dans le sol est la submersion de ce dernier : PATRICK et TURNER (1968) observent que lorsqu'on submerge totalement un sol, on assiste à une diminution rapide du taux de $Mn^{++}$ réductible et à une élévation du taux de $Mn^{++}$ échangeable, alors que les teneurs en $Mn^{++}$ soluble à l'eau, en $Mn^{++}$ lié aux composés organiques et en $Mn^{++}$ résiduel ne sont pas affectées. Ces conditions limites ne se trouvent évidemment réalisées que dans des cas bien particuliers (sols de rizières notamment) ; il n'en reste pas moins que l'existence d'une phase d'anaérobiose suffisamment longue peut être à l'origine d'une augmentation importante du taux de $Mn^{++}$ mobile du sol.

Une autre cause favorable à la production de manganèse facilement utilisable par les plantes est la déshydratation du sol, et notamment la déshydratation des sols à réaction alcaline ; si l'on se réfère aux travaux cités par BITTEL (1957), cette aug-

mentation notable de la teneur en $Mn^{++}$ à la suite d'une dessiccation accentuée résulterait d'une dismutation du sesquioxyde de manganèse ($Mn_2O_3$) ou de l'oxyde salin de manganèse ($Mn_3O_4$) selon les réactions globales suivantes :

$$Mn_2O_3 + 2\ H^+ \leftrightarrows MnO_2 + Mn^{++} + H_2O$$
$$Mn_3O_4 + 2\ H^+ \leftrightarrows Mn_2O_3 + Mn^{++} + H_2O$$

Il y aurait donc, au cours de ce phénomène, apparition de $Mn^{++}$ échangeable et d'oxydes de néoformation facilement réductibles. Il est vraisemblable que c'est un mécanisme de ce type qui permet d'expliquer l'augmentation massive du taux de manganèse actif, que l'on observe quelquefois dans les sols de serre stérilisés à la vapeur (DAVIS, 1957 ; OSAKI, 1953, cités par MESSING, 1965), ou dans certaines litières forestières soumises à une sécheresse estivale accusée (VALLÉE, 1967).

Il faut reconnaître que de nombreux aspects de la dynamique de $Mn^{++}$ dans les sols sont encore mal connus ; dans ces conditions, il ne faut pas s'étonner de la difficulté que l'on peut éprouver à établir un diagnostic en ne s'appuyant que sur l'analyse du sol et de la multiplicité des critères adoptés par différents auteurs pour définir le seuil de toxicité. Fort heureusement, les symptômes que présentent les plantes intoxiquées par $Mn^{++}$ et le dosage de cet élément dans le végétal permettent d'étayer un peu mieux le diagnostic de la toxicité.

### b) *Symptômes de toxicité en manganèse*

La toxicité en manganèse peut s'extérioriser de deux manières différentes : soit par la manifestation de symptômes résultant d'une action toxique directe de l'élément, soit par l'apparition d'une véritable chlorose ferrique qui doit être considérée alors comme la conséquence d'une action indirecte de l'intoxication manganique ; ces deux grands groupes de symptômes peuvent d'ailleurs parfaitement coexister sur une même plante.

Le symptôme d'intoxication directe que l'on peut observer chez la plupart des plantes atteintes est la présence de taches noirâtres, de dimensions variables mais aux contours assez réguliers, qui se développent surtout le long des tissus conducteurs (tiges, pétioles, nervures principales) : lorsqu'elles sont très petites et particulièremen abondantes, elles peuvent se rejoindre et former des stries noirâtres qui se développent parallèlement à l'axe principal des tiges et des nervures centrales des feuilles : ce symptôme caractéristique a été observé notamment par COPPENET (1959, 1960) sur Pomme de terre, par BRANAS *et al.* (1964), par VIDAL *et al.* (1969) et par FORT (1969) sur Vigne. Dans le cas de la Vigne, VIDAL *et al.* (1968) ont remarqué que ces taches foncées sont surtout abondantes sur les sommets, les vrilles, les rafles et quelquefois sur les pétioles (en particulier chez le *Maccabeo* et le *Carignan*, qui sont très sensibles à l'excès de $Mn^{++}$, alors qu'elles sont beaucoup plus rares chez le *Grenache*, plus tolérant vis-à-vis du manganèse).

En cultivant de la vigne sur milieu synthétique en présence de concentrations élevées en manganèse, FORT (1969) a constaté que la prolifération de ces taches est très rapide et qu'elles finissent par envahir les feuilles où elles se localisent le long des nervures ou aux extrémités du limbe. D'autres plantes pérennes peuvent présenter ce symptôme ; en particulier au Japon, MORITA et AOKI (1968) ont pu observer que des Citrus poussant en sols acides riches en $Mn^{++}$ actif ont leurs feuilles

ponctuées de ces taches sombres ; dans les cas les plus graves, la multiplication de ces taches entraîne une défoliation anormale de l'arbre.

Il est maintenant assez bien établi que ces taches brunes, qui traduisent une absorption exagérée de manganèse, correspondent à des accumulations localisées de cet élément. Cette accumulation de $Mn^{++}$ en des sites bien particuliers des organes végétaux a pu être mise en évidence chez de nombreuses plantes et notamment chez la Vigne (FORT, 1969), grâce à l'utilisation de l'isotope radioactif $^{54}Mn$ (fig. 3). La nature des combinaisons dans lesquelles se trouve engagé le manganèse dans ces accumulations n'est pas connue : il pourrait s'agir, selon les différents auteurs, soit de bioxyde de manganèse, soit de silicate, soit de composés organométalliques divers dont la biosynthèse serait la conséquence d'une réaction d'autodéfense du végétal contre l'élément toxique.

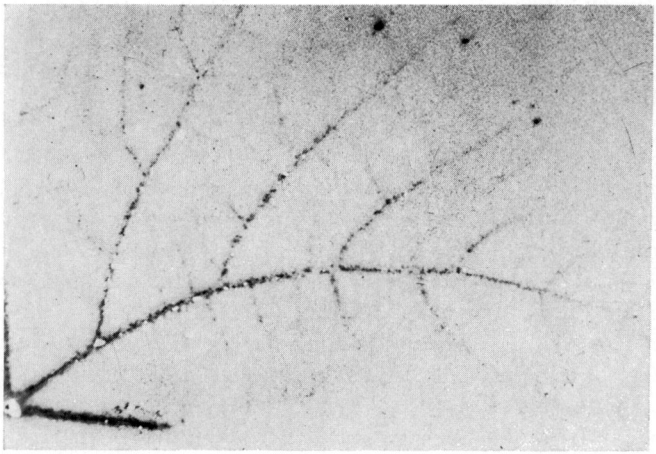


FIG 3. — *Autoradiographie d'un fragment de feuille de vigne* (*cépage* Maccabeo) *provenant d'une plante cultivée sur un milieu synthétique fortement enrichi en sulfate de manganèse marqué* ($^{54}Mn$)

(Noter l'accumulation de $^{54}Mn$ le long des nervures et aux extrémités du limbe)

Ces observations, qui font état de la présence de fortes quantités de manganèse dans les parties aériennes des végétaux intoxiqués, témoignent du caractère original de ce métal puisque celui-ci, relativement peu mobile dans la plante, l'est cependant beaucoup plus que la plupart des autres oligo-éléments qui demeurent bloqués au niveau des racines quand ils sont en excès. Si cette propriété particulière de $Mn^{++}$ permet de faciliter le diagnostic de la toxicité, elle ne peut en aucune manière être considérée comme suffisante, étant donné que beaucoup de végétaux (notamment le riz, et certaines essences forestières) ont la faculté d'accumuler apparemment sans dommage des quantités importantes de cet élément (ROUSSEAU, 1959 ; MORRISSON et ARMSON, 1964 ; SEILLAC, 1966).

Beaucoup d'autres symptômes d'intoxication ont été signalés ; il s'agit le plus souvent de nécroses des feuilles qui peuvent entraîner leur déformation (involution, enroulement), leur dessèchement et, dans les cas les plus graves, une défoliation sévère de la plante. En fait, ces symptômes, qui sont surtout observés en plein champ, sont très difficiles, voire impossibles à reproduire sur milieu nutritif synthétique :

il est vraisemblable que l'on doit les considérer comme traduisant une action indirecte de l'excès de manganèse (inhibition de l'absorption ou de l'utilisation d'un élément essentiel) ou reflétant l'absence d'autres éléments dans le sol comme le magnésium ou le calcium (BRUZAU *et al.*, 1968).

La chlorose ferrique induite par un excès de manganèse peut être parfaitement et très rapidement obtenue sur milieu synthétique, même dans le cas de plantes pérennes comme la Vigne (VIDAL *et al.*, 1968 ; FORT, 1969). En plein champ, cette forme d'intoxication manganique n'est que très rarement observée : elle a été signalée chez des végétaux en voie de croissance rapide ou soumis à de fortes intensités lumineuses.

### c) *Interactions entre certains éléments minéraux et le manganèse dans les végétaux intoxiqués par un excès de cet élément*

L'interaction la plus anciennement connue est sans doute celle du fer et du manganèse (CHAPMAN, 1931) ; si l'excès de $Mn^{++}$ déprime l'absorption et surtout l'utilisation du fer, l'augmentation de la teneur en fer du milieu peut, inversement, contribuer à limiter l'absorption du manganèse et, en conséquence, atténuer les symptômes d'intoxication (FORT, 1969).

L'aluminium diminue aussi considérablement l'absorption de $Mn^{++}$ ; il en est de même du calcium et surtout du magnésium dont l'action dépressive vis-à-vis de l'absorption du manganèse est grandement augmentée en présence de $Ca^{++}$ (MAAS *et al.*, 1969). A l'opposé, le manganèse déprime très fortement l'absorption du magnésium, surtout lorsque le niveau du calcium est très bas (MAAS *et al.*, 1969) et, dans ces conditions, il est fort possible que certaines carences magnésiennes qui apparaissent en sols très acides résultent de la présence d'un excès de Mn actif dans ces sols.

L'action du phosphore est plus discutée ; cet élément pourrait, selon les cas décrits, inhiber ou stimuler l'absorption de $Mn^{++}$ (JACKSON *et al.*, 1964). Inversement, nous avons observé que, dans le cas de vignes intoxiquées par un excès de manganèse, de fortes concentrations de cet élément dans les feuilles et les sarments étaient toujours associées à de fortes teneurs en phosphore.

Les interactions $K^{+}$-$Mn^{++}$ sont assez mal démêlées : dans le cas de la Pomme de terre, BOLLE-JONES (1955) a constaté que $K^{+}$ augmente la proportion de $Mn^{++}$ dans les tiges en début de végétation et la diminue par la suite ; en ce qui concerne la Vigne, nous avons pu observer à différentes reprises que les plantes intoxiquées accumulaient intensément le potassium (tabl. 1).

L'absorption du manganèse serait aussi fortement influencée par la source d'azote présente dans le milieu nutritif : l'azote nitrique stimulerait l'absorption de $Mn^{++}$, alors que l'azote ammoniacal la déprimerait fortement (VLAMIS et WILLIAMS, 1962), et cela même dans un milieu où les modifications de pH résultant de l'utilisation préférentielle de l'une ou l'autre forme d'azote sont empêchées.

Enfin, l'influence très bénéfique des silicates sur les manifestations de la toxicité en $Mn^{++}$ ont été signalées à diverses reprises : d'après WILLIAMS et VLAMIS (1957), la silice interviendrait, non pas tellement en diminuant l'absorption de $Mn^{++}$ et sa concentration dans les feuilles, mais en empêchant son accumulation préférentielle dans certains tissus, et par conséquent en s'opposant à l'apparition des taches brunes caractéristiques de l'intoxication manganique.

TABLEAU I

*Composition minérale des feuilles de vigne (cépage* Maccabeo*) cultivée sur milieu synthétique enrichi en manganèse*

| Teneur en manganèse de la solution nutritive (mg/l) | Chlorophylle (‰ de matière fraîche) | En p.p.m. de matière sèche | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Mn | Fe | $P_2O_5$ | Ca | K | Mg |
| Témoin ..... | 2,260 | traces | 120 | 12 620 | 4 000 | 20 320 | 3 600 |
| 50 ..... | | 1 160 | 110 | 10 940 | 4 240 | 19 440 | 3 080 |
| 100 ..... | | 2 320 | 80 | 15 200 | 4 400 | 28 240 | 3 600 |
| 200 ..... | 0,018 | 5 070 | 430 | 17 630 | 4 640 | 40 000 | 3 080 |

d) *Méthode de lutte contre la toxicité en manganèse*

Le chaulage constitue la méthode de lutte la plus fréquemment utilisée contre la toxicité manganique. Si l'on se rapporte aux principales données bibliographiques, il semble que pour des pH eau supérieurs à 6, les risques de toxicité soient fortement amenuisés ; le chaulage agirait surtout en favorisant l'oxydation des formes bivalentes du manganèse et la formation d'oxydes peu réductibles. Des expérimentations réalisées dans les Pyrénées-Orientales par VIDAL *et al.* (1968) démontrent cependant que l'utilisation des carbonates de chaux et de magnésium s'avère beaucoup plus efficace que celle des carbonates de calcium pour le traitement de vignes intoxiquées par un excès de $Mn^{++}$. Des observations allant dans le même sens ont été faites par FORT (1969) au cours d'expériences en serre où l'auteur a pu constater que de la vigne cultivée en sol acide enrichi en manganèse réagissait beaucoup mieux au chaulage quand on ajoutait à la chaux du sulfate de magnésium.

Les amendements organiques peuvent aussi, dans la mesure où ils ne favorisent pas l'apparition de conditions réductrices dans le sol (enfouissement trop profond notamment) contribuer à diminuer la mobilité du manganèse, soit en favorisant la formation de complexes organométalliques peu utilisables par les végétaux (PRÉVOT *et al.*, 1955), soit en stimulant l'activité microbienne, laquelle serait à l'origine de l'immobilisation de $Mn^{++}$ dans les sols par oxydation biologique de celui-ci (VALLÉE, 1967 ; GEERING *et al.*, 1969).

Il n'en demeure pas moins que, dans certains cas, le relèvement du pH ou l'addition d'amendements organiques ne sont pas suffisants pour s'opposer aux conséquences d'un excès de manganèse ; une meilleure connaissance de certains aspects encore pas très clairement connus de la dynamique de $Mn^{++}$ dans les sols devrait certainement permettre d'améliorer les moyens de lutte contre les toxicités provoquées par un excès de cet élément.

## IV. — TOXICITÉ DUE A UN EXCÈS DE CUIVRE

a) *Conditions particulières favorables à l'apparition de la toxicité en cuivre*

L'intoxication des végétaux par le cuivre présent dans le sol constitue sans aucun doute l'un des exemples les plus caractéristiques des intoxications en oligo-éléments

résultant d'une intervention humaine ; en effet, si les toxicités dues à une accumulation naturelle du cuivre sont extrêmement rares et très localisées à la surface du globe (notamment à proximité des gisements cuprifères du Haut-Katanga : DUVIGNEAUD et DENAEYER DESMET, 1960), les accidents imputables à une accumulation du cuivre dans les sols à la suite d'applications répétées d'anticryptogamiques à base de ce métal sont beaucoup plus fréquents et peuvent revêtir dans certains cas une importance économique notable. Cette importance tient au fait que les composés du cuivre sont très largement et depuis fort longtemps, utilisés comme fongicides et que les plantes justiciables de traitements cupriques sont, pour la plupart, des plantes pérennes exigeant des applications répétées au cours de l'année — autant de choses favorables à l'accumulation du cuivre. Comme cette accumulation a lieu dans les horizons de surface, les racines des plantes pérennes ne sont généralement pas affectées, les accidents ne se produisant que lors de l'arrachage des plantations, quand on substitue à ces dernières des cultures exploitant les couches superficielles du sol. Ce phénomène n'est cependant pas absolument général, puisque REUTHER et SMITH (1953) ont pu observer des troubles de végétation imputables à un excès de cuivre dans de vieux vergers de Citrus qui recevaient, outre le cuivre apporté par les traitements phytosanitaires, une quantité non négligeable de ce métal ajoutée systématiquement aux engrais pour prévenir une éventuelle carence. Des observations du même ordre ont été faites par XUEREFF (1959) dans la vallée de l'Eyrieux, où des vergers de pêchers intoxiqués par le cuivre présentaient des symptômes caractéristiques de chlorose ferrique. Dans les deux cas (Citrus de Floride et pêchers de la vallée de l'Eyrieux), les vergers étaient implantés sur des sols légers très filtrants, favorables par conséquent à une certaine migration du cuivre vers les racines des arbres.

En raison de l'importance des surfaces occupées par la Vigne en France, et de celle des apports de cuivre nécessaires à sa protection sanitaire (de 15 à 50 kg/ha/an de cuivre), les problèmes susceptibles de se poser à la suite de l'enrichissement progressif du sol en ce métal ont retenu très tôt l'attention des agronomes et des chercheurs français (GIRARD, 1895 ; MAQUENNE et DEMOUSSY, 1919). Ce n'est cependant qu'à une époque relativement récente qu'ont été réalisés les travaux les plus complets et les plus systématiques concernant l'étude des symptômes de la toxicité en cuivre et des incidences de cette dernière sur la composition minérale des plantes ainsi que des moyens d'y remédier (ANNE et DUPUIS, 1953 ; DEPARDON et BURON, 1955 ; ANDRÉ, 1959 ; DROUINEAU et MAZOYER, 1953, 1962 ; DELAS *et al.*, 1959 ; DELAS, 1963).

Ces travaux, complétés par des études concernant plus spécialement la dynamique de $Cu^{++}$ dans les sols (BOISCHOT et QUILLON, 1952 ; BROADBENT, 1957 ; DELAS *et al.*, 1960 ; MULLER, 1960), ont montré que, pour une plante donnée, les risques d'intoxication dépendent de la quantité de cuivre échangeable présente dans le sol (cuivre extractible par une solution d'acétate d'ammonium N) et du pH. Ces deux données sont absolument indispensables au diagnostic de la toxicité : c'est ainsi que, d'après DROUINEAU et MAZOYER (1962), la toxicité serait certaine à partir de 100 p.p.m. de $Cu^{++}$ échangeable au-dessous du pH 6, des doses voisines de 50 p.p.m. étant susceptibles de diminuer la croissance au-dessous du pH 5. Pour DELAS, en sol sableux très acide, la toxicité apparaîtrait dès 25 p.p.m. de $Cu^{++}$ échangeable.

b) *Symptômes de toxicité en cuivre et interaction de ce métal avec les autres minéraux*

Le symptôme essentiel de l'intoxication par le cuivre est la réduction très sensible de la croissance du végétal, réduction qui intéresse plus particulièrement le système radiculaire. Il n'y a donc, à vrai dire, pas grand-chose de bien caractéristique dans cette manifestation de la toxicité, qui peut cependant s'accompagner quelquefois de rougissements et de dessèchements. Des chloroses, en tous points comparables à celles qui se manifestent à la suite d'une carence en fer, peuvent apparaître chez les végétaux particulièrement exigeants en ce métal (Pêcher, Citrus), placés dans des milieux pauvres en fer comme certains sols sableux ; il est vraisemblable, d'après les travaux de LINGLE *et al.* (1963) que cette interaction cuivre-fer se situe au niveau de l'absorption et du transport du fer et certainement pas au niveau de son utilisation, puisque des pulvérisations de sels de fer entraînent un reverdissement ponctuel des plantes chlorosées.

Comme le souligne DELAS (1963), les observations concernant l'influence de la toxicité du cuivre sur la composition minérale des plantes sont très variées, et souvent opposées selon les auteurs ou les plantes considérées. Quelques constantes paraissent cependant se dégager : il y a en effet presque toujours accumulation d'azote, de calcium et de magnésium ; (FORSTER, 1954 ; DROUINEAU et MAZOYER, 1962) et diminution notable de la teneur en potassium, diminution que DROUINEAU et MAZOYER (1962) attribuent au faible développement du système radiculaire. Par contre, les observations concernant l'action d'un excès de cuivre sur la concentration en P de la plante sont beaucoup plus disparates.

En ce qui concerne les interactions avec les oligo-éléments autres que le fer, c'est surtout le comportement du molybdène qui a retenu l'attention des chercheurs, notamment celle de NEELAKANTAN et MEHTA (1961) qui ont montré qu'en culture sur sable l'augmentation de la teneur en $Cu^{++}$ du milieu nutritif déprimait la teneur en molybdène des plantes ; cette observation a pu être mise en parallèle avec celle réalisée dans le règne animal où l'on a constaté que des moutons extériorisaient des signes de carence ou de toxicité en cuivre selon qu'ils étaient nourris avec un fourrage trop riche ou trop pauvre en molybdène.

Les causes profondes qui sont à l'origine de la phytotoxicité spécifique du cuivre sont encore assez mal connues ; on ne doit pas s'en étonner outre mesure, étant donné que la nature des processus biochimiques dont la perturbation entraîne la mort des champignons traités par des sels de cuivre est elle-même encore assez mal précisée, bien que ce métal soit utilisé depuis fort longtemps à des fins fongicides. D'après WALLACE (1957), c'est surtout au niveau de l'activité catalytique intéressant les mécanismes d'oxydo-réduction qu'interviendrait $Cu^{++}$, en diminuant notamment la catalase et la peroxydase des tissus végétaux ; c'est vraisemblablement cette intervention au niveau des processus d'oxydo-réduction qui est à l'origine de la très grande phytotoxicité spécifique du cuivre.

c) *Méthodes de lutte contre la toxicité du cuivre*

La méthode de lutte la plus fréquemment préconisée consiste à relever le pH du sol par des chaulages convenables, de manière à provoquer l'insolubilisation du cuivre. D'après DROUINEAU et MAZOYER (1962), et également d'après DELAS, on peut par-

venir à ce résultat en amenant au-delà de 6-6,5 le pH d'un sol dont la teneur en $Cu^{++}$ échangeable est inférieure à 200 p.p.m., les meilleurs résultats étant obtenus lorsqu'on utilise un calcaire magnésien.

Quand la teneur en cuivre du sol est trop importante, même les chaulages les plus massifs s'avèrent insuffisants pour faire disparaître les sympômes de toxicité. Ceci est dû au fait que le cuivre, contrairement à la plupart des autres métaux lourds, peut exister à l'état ionique dans des conditions de pH qui sont celles de beaucoup de sols, cette propriété déterminant le caractère irrémédiable que peut revêtir une trop forte accumulation de cuivre dans le sol. Cette rémanence de la toxicité du cuivre, même dans des sols convenablement amendés, a été bien mise en évidence dans un essai de longue durée réalisé par la Compaguie nationale d'Aménagement du Bas-Rhône et Languedoc (1966). Cet essai a permis de constater que des apports de dolomagnésie de l'ordre de 4 t/ha sur des sols enrichis en cuivre ne permettaient pas d'obtenir des rendements supérieurs de plus de 50 p. 100 à ceux des mêmes cultures végétant en sols non enrichis en cuivre (fig. 4).

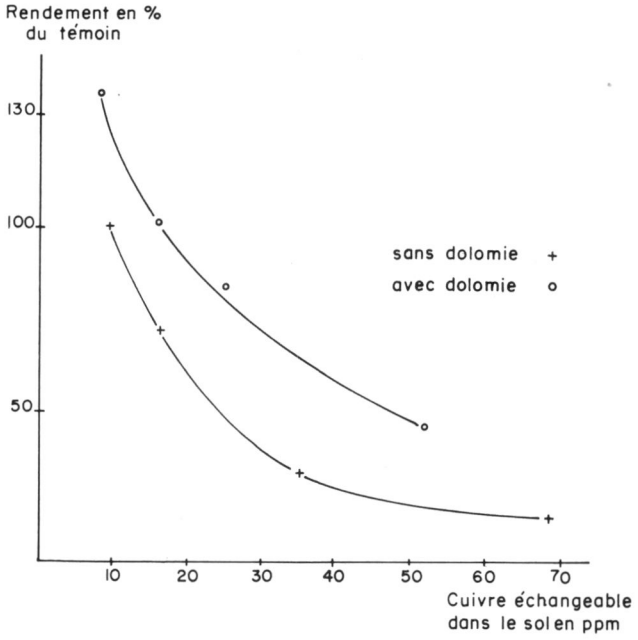



FIG. 4. — *Relation entre le rendement pondéré de 12 cultures et la teneur du sol en cuivre échangeable*
(Extrait du C. R. d'activité 1966 de la Compagnie nationale d'Aménagement du Bas-Rhône et Languedoc)

Les amendements organiques utilisés à forte dose peuvent aussi, en bloquant le cuivre sous forme de complexes organo-métalliques insolubles ou en favorisant sa migration sous forme de composés solubles, diminuer sensiblement l'activité de ce dernier ; de même des chélates de fer, associés ou non à des chaulages, permettent d'atténuer les chloroses provoquées par un excès du $Cu^{++}$.

En fin de compte, il semble que la meilleure méthode de lutte soit surtout préventive et consiste en un contrôle régulier du pH et de la teneur en cuivre échangeable des sols susceptibles de recevoir, en raison de la nature des cultures

qu'ils supportent (vignes et arbres fruitiers) des quantités importantes de ce métal. Ce contrôle devra être renforcé si on envisage à plus ou moins brève échéance un arrachage des plantations en vue de l'installation de cultures annuelles. On peut regretter que cette appréciation du niveau de toxicité du cuivre dans le sol repose sur l'interprétation de deux données (pH et teneur en $Cu^{++}$ échangeable) : la mise au point d'un test unique (par exemple : dosage du cuivre extrait par un réactif dont le pH serait voisin de celui du sol) devrait permettre de rendre plus simple et sans doute plus précise l'appréciation des niveaux de toxicité.

## V. — TOXICITÉ DUE A UN EXCÈS DE BORE

De nombreuses expériences de culture de végétaux sur des milieux synthétiques enrichis avec des doses croissantes de bore (notamment les expériences de BARBIER et CHABANNES, 1955) ont démontré que des taux extrêmement faibles de cet oligo-élément, à peine supérieurs à ceux qui provoquent des augmentations notables de croissance, pouvaient avoir un effet dépressif très marqué sur la végétation. La toxicité est plus difficile à faire apparaître quand le bore est ajouté, non pas à un milieu synthétique, mais à un sol : CHABANNES et BARBIER (1958) ont constaté en effet que des apports successifs de bore correspondant à 11 fois 20 kg/ha de borax, réalisés en 3 mois, bien que provoquant sur la succession des cultures (tomate-blé-luzerne) l'apparition de nécroses sur feuilles, n'ont pas entraîné de baisse significative de rendement. Ces résultats rejoignent les observations faites par les expérimentateurs de la C^ie^ Nationale d'Aménagement du Bas-Rhône et Languedoc (1966), dans des champs d'expériences où des apports périodiques de borax (deux par an) équivalant dans certains cas à un apport cumulé de 420 kg/ha en 3 ans, n'ont pas entraîné l'apparition de symptômes ou d'effet dépressif sur les sept cultures qui se sont succédées pendant ces trois années. Par contre, un apport unique de l'ordre de 200 kg/ha de borax a provoqué un effet dépressif très net sur la culture de pomme de terre qui a suivi immédiatement cet apport. Les expérimentateurs en concluent que, pour les conditions expérimentales dans lesquelles ils opèrent (sols irrigués), un apport périodique de bore de l'ordre de 1 à 2 kg/ha paraît constituer une excellente assurance contre l'apparition de carences en cet élément, sans pour autant exposer les cultures à des risques sérieux de toxicité.

Il convient cependant de rappeler que la sensibilité à l'excès de bore dépend en grande partie de l'espèce végétale ; c'est ainsi que, d'après GÄRTEL (1962), la vigne serait particulièrement sensible : un excès de cet élément provoque chez cette dernière un développement exagéré des rameaux secondaires, ce qui donne à la plante un aspect buissonnant ; en outre, les feuilles sont déformées (aspect de « spatules ») et se couvrent de nécroses ; la toxicité se manifesterait pour des apports de 200 kg/ha de borax dans de jeunes plantations de vigne, et à partir de 30 à 40 kg/ha dans les pépinières.

L'aspect buissonnant des plantes intoxiquées par un excès de bore se retrouve chez le houblon (MAROCKE, 1961) ; chez cette espèce, l'intoxication s'extériorise, dans les cas les plus bénins, par une légère chlorose internervaire ; les cas les plus graves se traduisant par une cessation de la croissance du méristème terminal des lianes, un dessèchement des tissus foliaires qui peut provoquer l'enroulement en coupe des

feuilles, puis le dessèchement complet et la mort de la plante ; en fait, ces accidents ont été observés dans des cultures réalisées en vases de végétation, sur des sols très fortement enrichis en bore (au minimum, l'équivalent de 300 kg/ha de borax).

D'après THELLIER (1963), les cryptogames seraient beaucoup plus sensibles à l'excès de bore que les Dicotylédones, puisque certains de ceux-ci peuvent supporter des concentrations en B de l'ordre de $2 \cdot 10^{-6}$ g/ml, alors que les cryptogames sont fortement intoxiqués pour des teneurs de $4 \cdot 10^{-8}$ à $2 \cdot 10^{-7}$ g/ml.

De même que pour le manganèse, l'excès de bore se traduit par une augmentation notable de la concentration de ce dernier dans les parties aériennes des végétaux ; d'après les travaux de OERTLI et KOHLH (1961), des plantes contenant moins de 1 000 p.p.m. de B ne présenteraient pas de symptômes d'intoxication, alors que des chloroses apparaîtraient entre 1 000 et 1 500 p.p.m., et des nécroses au-dessus de 1 500 p.p.m. En accord avec CHABANNES et BARBIER (1958), OERTLI, LUNT et YOUNGNER (1961) ont constaté que certaines graminées cultivées sur milieu synthétique enrichi en bore continuaient à avoir une croissance normale et ne donnaient pas lieu à une réduction de récolte malgré l'extériorisation de chloroses et de nécroses. OERTLI et ROTH (1969) attribuent cette forte migration du bore en excès vers les parties aériennes de la plante au fait que cet élément serait entraîné passivement par le courant de sève ascendante et s'accumulerait aux points de sudation des feuilles, entraînant au niveau de ces zones une augmentation importante de la pression osmotique à l'origine des nécroses. Dans une certaine mesure, ces résultats recoupent ceux de THELLIER (1963), qui a montré, en utilisant l'activation neutronique, que les plus fortes concentrations en bore observées chez les plantes se situent bien au niveau des points de sudation.

## VI. — TOXICITÉS DUES A UN EXCÈS DE CHROME OU DE NICKEL

Les toxicités dues à la présence d'accumulations naturelles de chrome ou de nickel sont extrêmement localisées à la surface du globe. SOANE et SAUNDER (1959) ont signalé l'existence de telles accumulations dans les sols formés sur serpentine dans le sud-ouest de la Rhodésie : l'accumulation du chrome dans ces sols est telle qu'aucune culture ne peut être menée à son terme, et cela malgré des chaulages massifs élevant le pH au-dessus de 8.

Si les intoxications par excès de chrome ou de nickel d'origine géologique sont très localisées et ne revêtent de ce fait qu'une importance minime, le problème peut se poser en termes très différents quand on envisage l'utilisation à des fins agricoles de déchets riches en ces éléments. C'est notamment le cas du chrome, dont les sels (essentiellement le sulfate de chrome) sont utilisés dans l'industrie du tannage des cuirs ; les sous-produits de cette industrie peuvent constituer une source d'azote lentement minéralisable, fort utile pour certains types de culture, mais il est bien évident que l'emploi de ces sous-produits serait à déconseiller si les sels de chrome qu'ils renferment en abondance s'avéraient toxiques pour les cultures.

Les expériences de culture en serre réalisées par MOULINIER et MAZOYER (1968) démontrent qu'en fait, le sulfate de chrome et l'oxyde de chrome présents dans les déchets de tannerie n'exercent un effet toxique de manière significative que dans

des sols acides et que cet inconvénient est très facilement supprimé par l'addition de carbonate de chaux ou de phosphates (d'après les auteurs, il suffirait de mélanger aux déchets de tannerie de la chaux ou même des scories simples pour éviter tout risque de phytotoxicité).

Il n'en reste pas moins que, sous certains états d'oxydation, le chrome existant à l'état naturel dans les sols (notamment les chromates) peut s'avérer extrêmement toxique à des doses de l'ordre de 1 kg/ha (GROSMAN, 1966), la toxicité se traduisant surtout par une très forte réduction de la croissance du système radiculaire.

## VII. — TOXICITÉ DUE A UN EXCÈS DE ZINC

L'importance que revêt le zinc dans la nutrition des plantes de grande culture (particulièrement le Maïs) et la fréquence des carences en cet oligo-élément peuvent avoir pour conséquence, à la suite de la multiplication des traitements de cette carence, un enrichissement en zinc trop important du sol.

Dans le but de chiffrer les doses à partir desquelles des accidents de végétation peuvent se produire par excès de zinc, DARTIGUES et LUBET (1968) ont enrichi fortement un sol sableux, pauvre en matière organique et à réaction neutre, avec des quantités croissantes de sulfate de zinc (de 0 à 1 500 kg/ha) ; ce sol a porté du maïs pendant trois années consécutives, puis des pommes de terre. Malgré l'apparition de signes d'intoxication (croissance nettement déprimée) au stade plantule, les résultats n'ont montré aucune action significative sur la production du grain ; par contre, il y a eu une réduction très nette (25 p. 100) de la production de pommes de terre pour la dose de 250 kg/ha, attribuable aussi bien à la diminution du nombre de tubercules qu'à celle de leur dimension moyenne.

Cette expérience démontre donc que, même dans le cas de sols très aptes à céder le zinc, il ne semble pas que l'excès de ce métal résultant de traitements correctifs répétés soit de nature à perturber la croissance du Maïs, ni même celle d'autres végétaux plus sensibles, compte tenu de l'ordre de grandeur des doses habituellement conseillées pour contrôler la carence.

Par contre, une véritable stérilisation du sol provoquée par l'accumulation du zinc peut être observée au voisinage des mines où sont exploités les minerais de zinc. CARLES *et al.* (1969) ont observé ce phénomène à proximité des gisements de Bentaillou dans l'Ariège, où les remblais de minerai et les emplacements situés sous les câbles servant à son transport sont à peu près totalement dépourvus de végétation ; quelques rares espèces, notamment le Serpolet et surtout *Armeria Halleri*, paraissent s'accomoder de ces substrats extrêmement riches en zinc (4 000 p.p.m. de zinc assimilable), cette adaptation (ou cette résistance spécifique) étant associée à une absorption et à une accumulation massive du métal dans la plante (7 000 p.p.m. au sommet des tiges). Il est bien évident que, pour aussi spectaculaires qu'ils soient, ces cas d'intoxication totale ne présentent, compte tenu des surfaces intéressées, aucun intérêt économique.

## VIII. — INTOXICATIONS EN ÉLÉMENTS-TRACES PROVOQUÉES PAR DES POLLUTIONS ATMOSPHÉRIQUES

Dans les périmètres urbains, on a pu constater que les teneurs du sol en oligo-éléments étaient généralement beaucoup plus élevées que dans les zones rurales. C'est ainsi que PURVES (1968) a remarqué que certains échantillons de terre prélevés dans des parcs ou des jardins de ville contenaient des quantités de cuivre extractible par l'EDTA souvent supérieures à 40 p.p.m., correspondant à des concentrations phytotoxiques. Ce même auteur a observé que les sols citadins contenaient de 2,5 à 4 fois plus de bore soluble à l'eau que les sols provenant de zones rurales : cette accumulation du bore à des concentrations très proches des concentrations phytotoxiques trouve son origine dans les retombées de suies qui sont particulièrement riches en cet élément.

La pollution par le plomb provenant du tétraéthyle de plomb contenu dans les carburants constitue un phénomène très général qui s'observe non seulement chez les végétaux prélevés dans les parcs des villes, mais également chez les plantes poussant en bordure des grands axes routiers ; compte tenu du développement croissant du trafic automobile, on peut prévoir que ce type particulier de pollution ira en s'accentuant au cours des prochaines décennies. La teneur en plomb des plantes est habituellement comprise entre 0,1 et 1 p.p.m. (MACLEAN *et al*, 1969), mais elle s'élève au-dessus de 20-25 p.p.m. chez les plantes prélevées le long des talus bordant les autoroutes ; des teneurs beaucoup plus élevées ont été observées aux U. S. A. par CANNON et BOWLES (1962), chez des plantes poussant à quelques mètres de nœuds routiers supportant un trafic extrêmement dense. D'après MARTEN et HAMMOND (1966), les végétaux poussant sur des sols très riches en plomb ne présentent pas de symptômes particuliers d'intoxication ni de réduction de croissance : un problème ne se pose que si les plantes polluées sont destinées à la nourriture des humains ou du bétail, en raison de la grande toxicité des composés du plomb pour les organismes animaux. Le dosage systématique du plomb dans les végétaux poussant au voisinage des axes routiers ou à proximité des villes constituera sans aucun doute dans l'avenir une mesure préventive d'hygiène absolument nécessaire ; cette mesure constituera en même temps un repère supplémentaire permettant d'apprécier le degré de pollution de l'atmosphère par les gaz brûlés rejetés par les véhicules automobiles.

L'intoxication des végétaux par les composés du fluor, dont la concentration dans l'atmosphère peut augmenter fortement au voisinage des usines traitant le minerai d'aluminium par électrolyse, ou des usines de fabrication des superphosphates, peut constituer dans les zones rurales voisines de certains centres industriels, un problème important. Cette intoxication se traduit, chez les végétaux atteints par les vagues de pollution, par l'apparition de lésions à la périphérie des feuilles, lésions dont la teinte peut varier selon les espèces végétales du brun foncé à l'ivoire ; chez le Maïs, les atteintes s'extériorisent par des marbrures et des chloroses.

L'éventail de sensibilité des diverses espèces végétales au fluor est extrêmement large : le Haricot, le Pétunia, le Coton seraient assez résistants ; dans une certaine mesure, les Graminées le seraient aussi, ce qui pourrait expliquer que des accidents de fluorose puissent se manifester chez du bétail alimenté par du fourrage ne présen-

tant aucun signe apparent d'intoxication par le fluor. D'après THOMAS (1951), les végétaux pourraient être intoxiqués par le fluor provenant du sol, de la même manière que par le fluor d'origine atmosphérique. Cependant, compte tenu de la très faible mobilité des composés fluorés dans le végétal (de CORMIS, 1968), il ne semble pas que le fluor originellement présent dans certains types de sols puisse être à l'origine d'accidents aussi aigus que ceux qui se manifestent à la suite des pollutions atmosphériques.

## IX. — CONCLUSION. CARACTÈRES PARTICULIERS DU DIAGNOSTIC DES TOXICITÉS EN OLIGO-ÉLÉMENTS

Comme nous l'avons vu à différentes reprises, un des aspects les plus frappants des toxicités provoquées par un excès d'oligo-éléments est l'absence de spécificité des symptômes, qui fait que l'on peut rencontrer une certaine difficulté à identifier l'oligo-élément responsable de la toxicité. En effet, le symptôme essentiel qui permet d'affirmer que l'on a affaire à une intoxication est la réduction de la croissance du végétal, réduction qui intéresse surtout le système radiculaire. Les autres symptômes (chloroses, nécroses, dessèchements) ne sont généralement que des symptômes de carences en éléments majeurs ou mineurs, reflétant les conditions de malnutrition dans lesquelles se trouve placée la plante intoxiquée, soit parce que son système radiculaire est atrophié, soit parce que l'élément toxique a perturbé l'absorption et l'utilisation des autres éléments minéraux. Le manganèse fait, dans une certaine mesure, exception à la règle, l'excès de cet élément entraînant l'apparition sur les parties aériennes des végétaux, de taches brunâtres bien typiques.

Si l'on peut éprouver quelques difficultés à déterminer une toxicité par la seule observation des symptômes extérieurs, on ne doit pas fonder grand-espoir sur le dosage dans la plante de l'oligo-élément supposé toxique, car, le plus souvent, celui-ci est stoppé dans les racines et ne migre que très peu vers les parties aériennes. Bien au contraire, on a pu souvent constater que, lorsqu'on trouve des quantités importantes d'un oligo-élément dans les parties aériennes d'un végétal, c'est que celui-ci est particulièrement tolérant vis-à-vis d'un excès de cet oligo-élément. Dans ce domaine, le bore et, surtout, le manganèse présentent une certaine originalité en raison de leur relative mobilité dans la plante : c'est sans doute là une des principales causes qui ont fait porter au manganèse, souvent à tort, toute la responsabilité de certains échecs culturaux observés en sols très acides.

En définitive, et malgré toutes ses lacunes, c'est donc surtout sur l'analyse des sols que l'on doit compter pour établir avec le maximum de certitude le diagnostic d'une toxicité provoquée par l'excès d'un oligo-élément.

*Reçu pour publication en juin 1970.*


## SUMMARY

### TOXIC EFFECTS OF TRACE ELEMENTS

Accidents attribuable to excesses of trace elements are more usually observe despecially on acid soils which have been insufficiently improved (cases of manganese and of aluminium) or on soils derived from geological substrates which are particularly rich in certain metallic elements

(cases of nickel, chromium and zinc). Accidents due to excessive corrective treatments with trace elements have been observed especially with copper and boron. The general method of attack which makes it possible almost always to control the unfavourable effects of the presence of an excessive amount of an trace element in the soil is to raise the pH of the latter.

## ZUSAMMENFASSUNG


### GIFTIGE WIRKUNG DER SPURENELEMENTE

Meistens werden die Unfälle. die einem Übermass an Spurenelementen zuzuschreiben sind, in den unzureichend gedüngten sauren Böden (Fall des Mangans und des Aluminiums) oder in Böden, die aus geologischen Substraten stammen, die besonders reich an bestimmten metallischen Elementen( Fall des Nickels, des Chroms, des Zinks), sind beobachtet. Unfälle, die sich aus einer übertriebenen Zufuhr zur Regulierung von Spurenelementen entstehen, wurden besonders im Falle des Kupfers und des Bors beobachtet. Die allgemeine Bekämpfungsmethode, die fast immer in der Lage ist, die ungünstigen Folgen eines im Übermass im Boden befindlichen Spurenelementes zu begrenzen, besteht in der Erhöhung des pH dieses Bodens.


## РЕЗЮМЕ


*Токсическое действие микроелементов.*

К. ЖЮСТ.

Признаки токсичности, вызванной излишком микроелементов, наблюдаются чаще всего у растений на почвах кислой реакции, недостаточно известкованных (марганец, алюминий), или на почвах, образованных геологическими субстратами особенно богатыми некоторыми металическими элементами (никкель, хром, цинк); токсичность вызванная внесением избыточных количеств микроелементов, применявшихся для исправления почв, наблюдалась особенно в случаях меди и бора. Увеличение pH почвы нердсталяет общий метод борьбы, почти всегда позволяющий ограничить неблагоприятные последствия вытекающие из присутствия избыточных количеств микроелементов в ней.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


André L., 1959. Observations préliminaires sur les phénomènes de phytotoxicité dus à l'accumulation du cuivre dans certains sols cultivés. *Bull. Soc. Franç. Physiol. vég.*, **5**, 90-92.

Anne P., Dupuis M., 1953. Toxicité du cuivre à l'égard de quelques plantes cultivées. *C. R. Acad. Agric.*, 58-60.

Barbier G., Chabannes J., 1955. Sur la rétention du bore dans les sols et ses conséquences agronomiques. *C. R. Acad. Agric.*, 259-263.

Bertrand D., de Wolf A., 1968. L'aluminium, oligo-élément nécessaire au maïs. *C. R Acad. Sci.*, **267**, 2325-2327.

Bétrémieux R., 1951. Étude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse dans les sols. *Ann. agron.*, 193-295.

BITTEL R., 1957. Étude d'une technique de détermination du manganèse « actif » du sol. Résultats expérimentaux. *Ann. agron.*, 91-109.

BOISCHOT P., QUILLON P., 1952. Fixation du cuivre dans les sols calcaires. *Ann. agron.*, **3**, 359-363.

BOLLE-JONES E. W., 1955. The effect of varied nutrient levels on the concentration and distribution of manganese within the potato plant. *Plant and Soil*, **5**, 45-60.

BRANAS J., BERNON G., VERGNES A., 1964. Intoxications et carences. *Progr. agr. vitic.*, **16**, 79-87.

BROADBENT F. E., OTT J. B., 1957. Soil organic matter-metal complexes. I. Factors affecting retention of various cations. *Soil Sci.*, **83**, 419-427.

BROGAN J. C., 1964. The effect of humic acid on aluminium toxicity. *8th Congr. intern. Sci. Sol*, **3**, 227-234.

BRUZAU F., JUSTE C., POUGET R., 1968. Mise en évidence d'une carence en calcium chez la Vigne cultivée en solution nutritive. *C. R. Acad. Sci.*, **266**, 116-118.

CANNON H. J., BOWLES J. M., 1962. Contamination of vegetation by tetraethyl-lead. *Science*, **137**, 765-766.

CARLES J., CALMES J., MAGNY J., PULOU R., 1969. La répartition du zinc et sa toxicité chez les végétaux. *C. R. Acad. Sci.*, **268**, 516-519.

CHABANNES J., 1958. Enquête sur les conséquences éventuelles d'applications répétées de borate aux terres cultivées. *C. R. Acad. Agric.*, 440-447.

CHAPMAN G. W., 1931. The relation of iron and manganese to chlorosis in plants. *New Phytol.*, **30**, 266-283.

CHENERY E. M., 1955. A preliminary study of aluminium and the tea bush. *Plant and Soil*, **4**, 174-220.

CLAIRON M., 1968. Action comparée d'apports de chaux et de magnésium sur la fertilité d'un sol de défriche de touyas. *Bull. Ass. fr. Ét. Sol*, 9-12.

CLARKSON D. T., 1965. Aluminium tolerance in species within the genus *Agrostis*. *J. Ecol.*, **54**, 167-178.

COPPENET M., 1959. Le manganèse dans les sols de Bretagne et ses relations avec la croissance des végétaux. *Ann. agron.*, 155-218.

COPPENET M., CALVEZ J., 1960. Observation d'un cas d'intoxication manganique de la pomme de terre sur sol très acide. *C. R. Acad. Agric.*, 728-734.

COMPAGNIE NATIONALE D'AMÉNAGEMENT DU BAS-RHÔNE ET LANGUEDOC, 1966. Incorporation au sol de composés boratés associés ou non à un amendement calcaire. *C. R. activité 1966. Champ d'essai d'Asport* (îlots 15 D et 15 C).

COMPAGNIE NATIONALE D'AMÉNAGEMENT DU BAS-RHÔNE ET LANGUEDOC, 1966. Étude de la toxicité d'apports de sulfate de cuivre effectués en 1962, et à différents niveaux, associés ou non à un amendement calcaire (dolomie). *C. R. activité. Champ d'essai d'Asport* (îlot 8).

CORMIS L. de, 1968. Absorption des fluorures en solution et migration du fluor chez la tomate. *Ann. Physiol. vég.*, **10**. 155-169.

DARTIGUES A., LUBET E., 1968. Résultats d'expérimentations culturales sur la carence et la toxicité du zinc dans quelques sols du Sud-Ouest. *Bull. Ass. fr. Ét. Sol*, 19-31.

DAVIES H. N., 1957. Steam sterilization studies. *Rep. Glasshouse Crops Research Inst.*, 70-79.

DELAS J., DELMAS J., RIVES M., BAUDEL C., 1959. Toxicité du cuivre dans les sols viticoles du Sud-Ouest atlantique. *C. R. Acad. Agric.*, 651-655.

DELAS J., DELMAS J., DEMIAS C., 1960. Étude par dilution isotopique du cuivre incorporé dans les sols depuis 70 ans. *C. R. Acad. Sci.*, **250**, 3867-69.

DELAS J., 1963. La toxicité du cuivre accumulé dans les sols. *Agrochimica*, VII, 258-288.

DELMAS J., 1967. Effet toxique de l'aluminium sur *Vitis vinifera*, variété « Merlot », cultivée en milieu contrôlé. *C. R. Acad. Sci.*, **265**, 1619-1622.

DEPARDON L., BURON P., 1955. Cultures agricoles sur défrichement de Vigne. *Ann. agron.*, **6**, 161-167.

DIOS-VIDAL R., BROYER T. C., 1962. Efecto de niveles altos de magnesio en la absorcion del aluminio y en el crecimiento del maiz en soluciones de cultivo. *Ann. Edafol. Fisiol. veg.*, **21**, 13-130.

DROUINEAU G., MAZOYER R., 1953. Toxicité du cuivre et évolution des sols sous l'influence des antiparasitaires. *C. R. Acad. Agric.*, 390-392.

DROUINEAU G., MAZOYER R., 1962. Contribution à l'étude de la toxicité du cuivre dans les sols. *Ann. agron.*, **13**, 31-53.

DUVIGNEAUD P., DENAEYER DES MET S., 1960. *Action de certains métaux lourds du sol (cuivre, cobalt, manganèse, uranium) sur la végétation dans le Haut-Katanga.* Rapp. du Sol et de la Végétation, 121-139, Masson, Paris.

FORSTER W. A., 1954. Toxic effects of heavy metals on crop plant grown in soil culture. *Ann. Appl. Biol.*, **41**, 637-651.

FORT B., 1969. *Influence de l'excès de manganèse sur la Vigne.* Diplôme d'études approfondies. Bordeaux, octobre 1969.

FOY C. O., FLEMING A. L., BURNS G. R., ARMIGER W. H., 1967. Characterization of differentia aluminium tolerance among varieties of wheat and barley. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **31**, 513-521.

GÄRTEL W., 1962. The significance of trace nutrient in Viniculture. *Landw. Forsch.*, **16**, 121-132.

GEERING H. R., HODGSON J. F., SDANO C., 1969. Micronutrient cation complexes in soil solution. IV. The chemical state of manganese in soil solution. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **33**, 81-85.

GIRARD A., 1895. Sur l'accumulation dans le sol des composés cuivriques employés pour combattre les maladies parasitaires des plantes. *C. R. Acad. Sci.*, **120**, 1147-1152.

GROSMAN R., 1966. Le chrome dans le sol et la plante. *Bull. Ass. fr. Ét. Sol*, 115-124.

HACKETT C., 1964. Ecological aspects of the nutrition of *Deschampsia flexuosa* C. The effect of aluminium, manganese and pH on germination. *J. Ecol.*, **52**, 159-167.

HORTENSTINE C. C., FISKELL J. G. A., 1961. Effect of aluminium on sunflower growth and uptake of boron and calcium from nutrient solution. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **25**, 304-307.

HUMPHRIES F. R., TRUMAN R., 1964. Aluminium and the phosphorus requirements of *Pinus radiata*. *Plant and Soil*, **20**, 131-134.

JACKSON W. A., CRAIG D., LAUDENCIA P. N., CARSON E. W. Jr, 1964. Effects of phosphorus nutrition on manganese uptake and transport in wheat seedling. *8th Congr. intern. Sci. Sol*, **4**, 165-174.

JACKSON W. A., 1967. Physiological effects of soil acidity. In *Soil acidity and liming*, Ed. Pearson and Adams, Madison, U. S. A., 274 p.

JUSTE C., 1965. *Contribution à l'étude de la dynamique de l'aluminium dans les sols acides du Sud-Ouest atlantique : application à leur mise en valeur.* Thèse, Nancy.

JUSTE C., HAMADI M., 1963. Acidité et aluminium échangeable de quelques sols du Sud-Ouest atlantique. *C. R. Acad. Agric.*, 582-586.

JUSTE C., 1964. Influence du chaulage sur la phytotoxicité de l'aluminium mobile d'un sol de défriche riche en colloïdes minéraux. *Ann. agron.*, **15**, 5-22.

JUSTE C., SOLDA P., LABORDE A., DARRIGRAND M., 1968. Le chaulage et la mise en valeur des sols acides de défriche des Basses-Pyrénées. *C. R. Acad. Agric.*, 290-297.

KERRIDGE P. C., KRONSTAD W. E., 1968. Evidence of genetic resistance to aluminium toxicity in wheat. *Agron. J.*, **60**, 710-711.

LEFÈVRE-DROUET E., 1967. Sur l'aluminium complexé à la matière organique dans divers sols acides. *C. R. Acad. Agric.*, 926-932.

LINGLE J. C., LEE O., TIFFIN L. O., BROWN J. C., 1963. Iron uptake transport of soybeans as influenced by other cation. *Plant Physiol.*, **38**, 71-76.

MAAS E. V., MOORE D. F., MASON J. M., 1969. Influence of calcium and magnesium on manganese absorption. *Plant Physiol.*, **44**, 796-800.

MACLEAN A. J., HALSTEAD R. L., FINN B. J., 1969. Extractibility of added lead in soils and its concentration in plants. *Canad. J. Soil Sci.*, **49**, 327-334.

MACLEOD L. B., JACKSON L. P., 1967. Aluminium tolerance of two barley varieties in nutrient solution, peat and soil culture. *Agron., J.*, **59**, 359-363.

MAQUENNE L., DEMOUSSY E., 1919. Sur la richesse en cuivre des terres cultivées. *C. R. Acad. Sci.*, **169**, 937-942.

MAROCKE R., 1961. Recherches sur le houblon. *Bull. Ass. fr. Ét. Sol*, 39-45.

MARTEN J. C., HAMMOND P. B., 1966. Lead uptake by Bromegrass from contamined soils. *Agron. J.*, **58**, 553-554.

MESSING J. H. L., 1965. The effects of lime and superphosphate on manganese toxicity in steam sterilized soils. *Plant and Soil*, **23**, 1-16.

MORITA S., AOKI A., 1968. Abnormal defoliation of citrus in relation to the chemical composition of soil and plant. *9th Congr. intern. Sci. Sol*, **2**, 375-385.

MORRISON I. K., ARMSON K. A., 1964. The influence of manganese on the survival and growth of Jack Pine and Black Spruce seedlings. *Agron. Abstr.*, **53**.

MOULINIER M., MAZOYER R., 1968. Contribution à l'étude de l'action du chrome sur la croissance des végétaux. *Ann. agron.*, **19**, 553-567.

MULLER J., 1960. Echange des ions cuivriques sur les colloïdes minéraux. *Ann. agron.*, 75-91.

NEELAKANTAN V., MEHTA B. V., 1961. Copper status of soils of Western India. *Soil Sci.*, **91**, 251-256.

NORTON J., 1967. Some aspects of aluminium toxicity on plant growth. *Univ. Nottingham Rep. Sch. Agric.*, 99-103.

OERTLI J. J., LUNT O. R., YOUGNER V. B., 1961. Boron toxicity in several tuf grass species. *Agron. J.*, **53**, 262-265.

OERTLI J. J., KOLN H. C., 1961. Some consideration about the tolerance of various plant species to excessive supplies of boron. *Soil Sci.*, **92**, 243-247.

OERTLI J. J., ROTH J. A., 1969. Boron nutrition of sugar beet, cotton, and soybean. *Agron. J.*, **61**, 191-195.

OSAKI Ch. T., 1953. *Factors influencing the toxicity of manganese to tomatoes following the steaming of certain Ohio greenhouse soils.* Ph. D. Thesis, Ohio State University.

PATRICK W. H., TURNER F. T., 1968. Effect of redox potential on manganese transformation in waterlogged soil. *Nature*, **220**, 476-478.

PIERRE W. H., 1933. Determination of equivalent acidity and basicity of fertilizers. *Industr. engng. Chem.*, **5**. 229-234.

POCHON J., CHALVIGNAC M. A., 1964. Oxydation biologique du soufre et dégradation des sols de vignoble. *Agrochimica*, **9**, 155-161.

PRÉVOT P., OLLAGNIER M., AUBERT C., BRUGIÈRE J. M., 1955. Dégradation du sol et toxicité en manganèse. *Oléagineux*, **10**, 239-243.

PURVES D., 1968. Trace elements contamination of soils in urbean areas. *9th Congr. intern. Soil Sci.*, **11**, 351-355.

RANDALL P. J., VOSE P. E., 1963. Effect of aluminium on uptake and translocation of phosphorus by perennial rye-grass. *Plant Physiol.*, **38**, 403-409.

REUTHER W., SMITH P. F., 1953. Effects of high copper content of sandy soil on growth of citrus seedlings. *Soil Sci.*, **75**, 219-224.

ROUSSEAU L. S., 1959. *De l'influence du type d'humus sur le développement des plantules de sapins dans les Vosges.* Thèse, Nancy.

SEILLAC P., 1966. Recherches préliminaires sur la culture de jeunes plants de Pin maritime sur milieu liquide. *C. R. Acad. Sci.*, **262**, 1094-1096.

SLUIJSMANS C. M. J., 1966. Effect of fertilizers on the lime requirements of the soil. *Agri-Digest*, **8**, 10-16.

SOANE E. D., SAUNDER D. H., 1959. Nickel and chromium toxicity of serpentine soils in southern Rhodesia. *Soil Sci.*, **88**, 322-330.

SOMMER A. L., 1926. Studies concerning the essential nature of aluminium and silicon for plant growth. *Univ. California Pub. Agric*, **5**, 57-81.

STARKEY, R. L., 1966. Oxidation and reduction of sulfur compounds in soils. *Soil Sci.*, **101**, 297-306.

THELLIER M., 1963. *Contribution à l'étude de la nutrition en bore des végétaux.* Thèse, Paris, 155 p.

THOMAS-MOYER D., 1951. Gas damage to plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, **2**, 293-322.

VALLÉE G., 1967. *Nouvelles contributions à l'étude du rôle du manganèse dans la végétation de la sapinière forestière.* Thèse, Nancy.

VIDAL J.-P., JUSTE C., DELAS J., MARCELIN H., 1969. Excès de manganèse et dépérissement de la Vigne dans les sols acides du Roussillon. *Bull. tech. Pyr.-Orient.*, **50**, 3-19.

VIDAL J.-P., JUSTE C., 1967. Échec de la reconstitution de vignoble en terre acide en relation avec la présence d'aluminium mobile. Études et expérimentations. *Chambre Agric. Pyr.-Orient.*, 45-49.

VLAMIS J., WILLIAMS D. E., 1962. Ion competition in manganese uptake by barley plants. *Plant Physiol.*, **37**, 650-655.

WALLACE J. M., 1957. The influence of high nutrient levels of Co, Cu and Mn in leaf catalase and root peroxydase activity in soybeans plants grown with different levels of iron. *Diss. Abstr.*, **17**, 2398.

WILLIAMS D. E., VLAMIS J., 1957. The effect of silicon on yield and manganese uptake and distribution in the leaves of barley plants grown in culture solution. *Plant Physiol.*, **32**, 404-409.

XUEREFF R., 1959. La toxicité du cuivre dans les vergers de la vallée de l'Eyrieux. *Progr. Agric. Ardèche*, **49**, 1-6.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (5), 573-586.

# LE DIAGNOSTIC DES CARENCES EN OLIGO-ÉLÉMENTS AU MOYEN DE L'ANALYSE CHIMIQUE DES SOLS

L. DUVAL et J. MAURICE

*Station d'Agronomie*
*Boulevard Kerguélen, 29 S - Quimper*
*Institut national de la Recherche agronomique*

## RÉSUMÉ

En France, des méthodes d'analyses de sol ont été mises au point en vue de prévoir l'alimentation en oligo-éléments des végétaux. L'examen des possibilités de ces techniques fait l'objet du présent mémoire.

*Fer.* — La détermination du fer total ou du fer libre ne permet pas de connaître l'aptitude des sols à alimenter les plantes en cet élément. Par contre, le taux de calcaire extrait par l'oxalate d'ammonium permet de rendre compte du pouvoir chlorosant des sols. Dans le Sud-Est, le seuil de résistance à la chlorose est situé vers 7 p. 100 de calcaire actif.

*Cuivre.* — Dans les sols du Massif armoricain, les réactifs faibles n'extraient pas de cuivre ; mais la détermination du cuivre total permet d'établir une relation entre l'apparition des symptômes de carence et la teneur en cuivre du sol. Le seuil de carence se trouve situé entre 7 et 8 p.p.m. de Cu.

*Manganèse.* — L'utilisation du réactif acéto-acétique contenant du chlorhydrate d'hydroxylamine permet d'extraire une forme facilement réductible de manganèse. Dans les sols de Bretagne, le seuil de carence est situé vers 20 p.p.m. de Mn quand le pH eau est supérieur à 6,0. Les phénomènes de toxicité risquent d'apparaître quand le manganèse extrait est supérieur à 100 p.p.m. de Mn et le pH eau inférieur à 5,0.

*Zinc.* — Il est extrait, soit par l'acide chlorhydrique dilué à un pH d'extraction de 2, soit par l'acide chlorhydrique concentré. Dans les sols du Sud-Ouest, les symptômes de carence apparaissent sur le maïs quand le pH eau est supérieur à 6,4, et le taux de zinc inférieur à 3,3 p.p.m. de Zn extractible par l'acide chlorhydrique dilué et à 40 p.p.m. avec l'acide chlorhydrique concentré.

*Bore.* — Le réactif le plus souvent utilisé pour extraire le bore du sol est l'eau. Mais la détermination du seuil de carence pour les différents types de sols nécessite encore des expérimentations.

*Molybdène.* — Dans les sols de Bretagne, les différents réactifs expérimentés : eau, acétate d'ammonium, acide acétique, acide chlorhydrique, extraient des quantités négligeables ou nulles de molybdène alors que la fraction soluble dans l'oxalate acide d'ammonium est facilement mesurable, mais il n'est pas encore possible d'affirmer que le seuil de carence établi par GRIGG est applicable à ces sols.

*Cobalt.* — En Bretagne, il existe une relation entre le cobalt extrait du sol par l'acide acétique et la teneur en cobalt des végétaux. Les plantes récoltées sur les sols granitiques sont moins bien pourvues en cobalt que les plantes des sols schisteux.

## INTRODUCTION

Le diagnostic d'une carence en oligo-élément peut souvent être établi d'après l'examen des symptômes de la plante malade, car certains caractères sont spécifiques d'une déficience minérale. Mais, dans divers cas, il existe des caractères communs, d'une part, entre des carences d'origines différentes, d'autre part, entre des déficiences en oligo-éléments et des maladies non nutritionnelles. Aussi, l'établissement du diagnostic nécessite-t-il alors, en plus de l'examen des symptômes visuels, des analyses de plantes ou de sols. En outre, les présomptions de carence pourront être confirmées par la pulvérisation foliaire d'une solution contenant l'oligo-élément supposé être en proportion insuffisante.

La mise en évidence d'un phénomène de carence sur une plante permet d'intervenir pendant la période de végétation active. Mais cette intervention, souvent tardive, peut ne limiter les dégâts causés au végétal que dans une certaine mesure. Aussi, paraît-il plus opportun de déterminer au moyen d'une analyse de sol les probabilités d'apparition d'une carence et ainsi de prévoir l'alimentation des cultures en oligo-éléments.

En France, la détection de déficiences en oligo-éléments chez les végétaux a été à l'origine de la mise au point de méthodes d'analyses des sols en vue d'établir des seuils de carence. Dans le présent mémoire, nous examinerons les travaux analytiques relatifs aux oligo-éléments nécessaires aux végétaux : le fer, le cuivre, le manganèse, le zinc, le bore et le molybdène, et nous envisagerons aussi le cas du cobalt, qui n'est indispensable qu'aux animaux.

## I. — FER

La carence en fer, désignée sous le nom de chlorose ou encore chlorose ferrique ou chlorose calcaire, concerne la Vigne, les arbres fruitiers dont surtout le Pêcher et le Poirier, diverses espèces forestières, le Rosier, le Fraisier, les plantes ornementales telles que l'Hortensia et l'Azalée et les plantes de grande culture comme le Lupin et le Soja.

Les symptômes de cette carence, qui se manifeste dans les sols calcaires et dans les sols acides lorsque ceux-ci contiennent un excès de métaux lourds, consistent en un jaunissement internervaire, les nervures restant vertes plus longtemps. Ces symptômes apparaissent d'abord sur les feuilles les plus jeunes puis, progressivement, sur les feuilles les plus âgées. Dans les cas les plus graves, des taches nécrotiques brunâtres se forment sur le bord du limbe. Ces feuilles ont alors tendance à tomber plus tôt.

La détermination du fer total et même du fer libre ne permet pas de connaître l'aptitude des sols à alimenter les plantes en cet élément. Mais la détermination du taux de calcaire « actif », mise au point par DROUINEAU (1941), permet de rendre compte du pouvoir chlorosant des sols calcaires. Ce test a montré que c'est le calcaire contenu dans les fractions granulométriques inférieures à 20 $\mu$ qui est princi-

palement responsable de l'activité chlorosante du calcaire des sols (DROUINEAU, 1942). Ainsi, d'après les observations effectuées dans la région du Sud-Est, DROUINEAU (1949) a proposé comme seuil de résistance à la chlorose des arbres fruitiers les normes suivantes :

pêcher sur franc : 7 p. 100 de calcaire actif,
poirier sur cognassier : 8 p. 100 de calcaire actif.

Mais pour les sols du Bassin de la Garonne, LIWERANT (1960) a observé que ces espèces végétales se chlorosaient pour des teneurs en calcaire actif inférieures aux normes mentionnées ci-dessus. En outre, cet auteur a montré qu'il y a une bonne corrélation entre l'intensité des phénomènes chlorotiques et l'alcalinité de ces sols. Ainsi, les arbres risquent d'être atteints de chlorose pour les pH suivants :

pêcher sur franc pH > 7,7
pêcher sur prunier pH > 7,9
poirier sur cognassier pH > 8,1

Il est vraisemblable que pour des conditions pédo-climatiques différentes, il existe des divergences quant aux normes.

## II. — CUIVRE

Les carences en cuivre se manifestent dans des régions bien déterminées : les sols granitiques de Bretagne (COPPENET et JOLIVET, 1952), les sols sableux des landes de Gascogne (REDLICH, 1954), les sols gréseux de la Basse-Normandie et du Bas-Maine (DUVAL, 1963). Elles ont été observées sur les céréales, les petits pois et quelques graminées fourragères. Des carences en cuivre ont été signalées aussi sur des pommiers en Anjou (GEOFFRION, 1962).

Sur les végétaux, tels que l'Orge, le Blé, l'Avoine, le Ray-grass, la Fléole, les symptômes caractérisés par la décoloration de l'extrêmité des plus jeunes feuilles sont spécifiques et ne peuvent être confondus avec d'autres symptômes pathologiques.

Plusieurs auteurs ont tenté d'établir une relation entre l'apparition des symptômes de carences cupriques et les quantités de cuivre disponibles dans le sol. Dans les sols de Bretagne, caractérisés par une teneur élevée en matière organique, le choix d'un réactif capable d'extraire une forme assimilable de cuivre s'est révélé difficile, sinon impossible (COPPENET et CALVEZ, 1955) ; ainsi, le réactif acétoacétique Morgan-Barbier de pH = 4,8, la solution d'acide nitrique 0,04 N n'extraient pas de cuivre ; au contraire, avec ces deux réactifs, les terres expérimentées fixent le cuivre ajouté aux solutions d'extraction. L'acide nitrique décinormal fait passer très peu de cuivre en solution, tandis que l'acide nitrique normal extrait, à froid, de 5 à 25 p. 100 du cuivre total selon la teneur du sol et le temps d'agitation. Le fait que ces réactifs n'extraient que des quantités insignifiantes ou nulles pose de sérieux problèmes analytiques et il en résulte que l'établissement d'un seuil de carence est impossible.

Par contre, il existe une relation entre la teneur en cuivre total d'un sol et l'apparition des symptômes de carence cuprique sur les végétaux. La détermination

du cuivre total, après destruction nitroperchlorique de l'échantillon, a montré que les parcelles déficientes sur la granulite (granite à prédominance de muscovite) ont une teneur variant de 3 à 5,5 p.p.m., alors que les parcelles non carencées contiguës contiennent de 8 à 15 p.p.m. La très faible teneur du sol des parcelles carencées par rapport aux parcelles normales indique qu'il s'agit d'une véritable carence en cuivre total plutôt que d'un blocage de cet élément (COPPENET et CALVEZ, 1955). MITCHELL est arrivé à des conclusions identiques pour les sols d'Écosse ; il considère, en effet, que la teneur en cuivre total donne une indication plus intéressante que la teneur en cuivre soluble dans un autre agent d'extraction (MITCHELL, 1956).

L'utilisation de cette technique a montré que les sols gréseux de la Basse-Normandie et du Bas-Maine, sur lesquels l'Orge, le Blé, l'Avoine, le Ray-grass et la Fléole présentent de graves symptômes de déficience cuprique, sont également très pauvres en cuivre total ; leur teneur varie entre 1 et 8 p.p.m., et la valeur moyenne est inférieure à 5 p.p.m. (DUVAL, 1963). Elle a mis aussi en évidence que les sols de la Basse-Normandie et du Bas-Maine formés sur les granites à biotite (type granite de Vire) sont, contrairement aux sols granitiques de Bretagne, bien pourvus en cuivre ; ils contiennent environ 15 p.p.m. de cuivre total (DUVAL, 1962 et 1967) ; et l'expérience confirme que, sur ces sols, les végétaux sensibles à la déficience cuprique se développent toujours normalement sans apport de cuivre.

Dans les sols du Massif armoricain, le seuil de carence cuprique se trouve ainsi situé entre 7 et 8 p.p.m. de cuivre total.

## III. — MANGANÈSE

La carence en manganèse concerne diverses espèces cultivées sur sols légèrement calcaires, ou fortement chaulés, ou moyennement chaulés mais riches en matière organique, ou recevant des eaux d'égout. Il s'agit principalement de céréales (COÏC et COPPENET, 1948), de plantes maraîchères comme l'Épinard, le Pois, le Haricot et la Pomme de terre (TROCMÉ, BARBIER et CHABANNES, 1950 ; COPPENET, 1956) et d'espèces fruitières, surtout le Pêcher et le Cerisier (TROCMÉ et GRAS, 1964) ainsi que le Framboisier (DROUINEAU et MAZOYER, 1954).

Sur céréales, les symptômes de carence se traduisent par un port affaissé caractéristique et une chlorose ; en outre, on observe pour le Blé et l'Avoine des taches et nécroses vers la partie inférieure de la feuille, et pour l'Orge de petites bigarrures brunes allongées parallèlement aux nervures. Sur plantes maraîchères et sur espèces fruitières, les symptômes consistent en des chloroses marginales et internervaires assez diffuses, généralement sur les feuilles les plus âgées.

Pour prévoir des carences en cet élément, la connaissance de la teneur en manganèse total des sols se révélant en général peu valable, la plupart des auteurs ont cherché à doser les formes les plus facilement solubles. Les mesures de laboratoire ont ainsi porté sur les extractions suivantes :

1° *Mn extrait par l'eau distillée* (COPPENET, 1959). Ce test permet de rendre compte, dans une certaine mesure, de la capacité des sols humifères de Bretagne à alimenter les céréales. En effet, les chiffres obtenus sont plus élevés pour les sols acides de pH inférieurs à 6 que pour les sols dont le pH varie de 6,2 à plus de 7 et qui

donnent lieu à des carences. Mais l'application de ce test soulève des problèmes analytiques, les quantités dosées étant très faibles.

2° *Mn extrait par la solution d'un sel neutre* (TROCMÉ, BARBIER et CHABANNES, 1950 ; COPPENET, 1959). Par analogie avec d'autres cations, Mn ainsi extrait est appelé Mn échangeable. Mais la corrélation entre cette forme et l'alimentation des plantes est plutôt faible, car des facteurs tels que le pH, la matière organique, la dessiccation à l'air peuvent faire varier notablement les teneurs en Mn échangeable. De plus, comme précédemment, les mesures portent sur de très faibles quantités. Compte tenu de ces facteurs, les risques de carence pour les sols bretons ne peuvent être prévus avec certitude qu'au-dessous d'une teneur en Mn échangeable nettement inférieure à 1 p.p.m.

3° *Mn réductible à l'hydroquinone* (TROCMÉ, BARBIER et CHABANNES, 1950 ; COPPENET, 1959). Le manganèse peut être rencontré dans les sols sous 3 valences : 2, 3 et 4. Ces valences sont en équilibre entre elles. Seule la valence 2 contribue à former des combinaisons solubles. Mais sous l'influence des processus de réduction, une fraction des oxydes supérieurs est susceptible de passer en solution. Ce test à l'hydroquinone a justement pour but d'évaluer la quantité de manganèse susceptible d'être réduite facilement. Toutefois, il s'agit encore d'un test conventionnel, les quantités extraites dépendant notamment du temps d'agitation des suspensions de sol, du pH et de la teneur en matière organique. Cependant, la détermination de cette forme est facile analytiquement et permet de rendre compte de l'alimentation en manganèse des céréales pour des sols carencés ou normaux de Bretagne.

En définitive, les dosages de Mn échangeable n'étant pas suffisamment précis, il est préférable de déterminer Mn facilement réductible ou la somme de ces 2 fractions, somme appelée Mn actif.

4° *Mn actif* (COPPENET, 1959). Pour le dosage rapide de cette quantité, on utilise, pour les terres de Bretagne, le réactif acéto-acétique Barbier de pH 4,8 contenant 0,2 p. 100 de chlorhydrate d'hydroxylamine. Il a été ainsi possible de classer ces terres comme suit :

< 20 à 25 p.p.m., carence sur céréales, si pH eau > 6,0
25 à 100 p.p.m., teneur normale,
> 100 p.p.m., toxicité probable, si pH eau ⩽ 5

## IV. — ZINC

Les carences en zinc ont d'abord été observées sur des arbres fruitiers : Poiriers, Pommiers, Pêchers, Cerisiers (CHABANNES, TROCMÉ et BARBIER, 1949 et 1950 ; DELMAS et BERNHARD, 1951 ; DELMAS, 1953 et 1955 ; GEOFFRION, 1957), dans des régions diverses : région parisienne, Orléanais, Bassin aquitain, Roussillon, Anjou. Elles ont, ensuite, été décelées sur des plantes annuelles : sur le Lin dans la Somme, l'Eure, la Seine-Maritime (ANSELME et BOURGEOIS, 1958), et sur le Maïs, notamment dans le Sud-Ouest (ROUTCHENKO, 1961) et en Bretagne (COPPENET et DUVAL, 1965).

Elles se manifestent sur les arbres fruitiers par la présence de feuilles disposées en rosette. Sur le Maïs, le développement de deux bandes blanches dans la moitié inférieure du limbe des feuilles les plus âgées est typique d'une carence en zinc.

Si l'observation des plantes en cours de végétation permet de caractériser avec assez de certitude une carence en zinc, par contre, la prévision d'une alimentation zincique déficiente, d'après la détermination du zinc du sol, paraît aléatoire. Cependant, le dosage du zinc associé à d'autres déterminations chimiques peut, dans des conditions pédoclimatiques données, constituer un test très valable. Citons à cet égard les travaux de DARTIGUES et de LUBET dans le bassin de l'Adour (DARTIGUES et LUBET, 1967). Ces auteurs ont tenté d'établir une relation entre la manifestation des symptômes de carence zincique sur le Maïs et le taux de zinc extractible soit par HCl dilué pour un pH d'extraction de 2, soit par HCl concentré, c'est-à-dire le zinc total. Ce test chimique a permis de fixer, avec certitude, un seuil au-delà duquel les symptômes de déficience zincique n'apparaissent pas ; il est de 3,3 p.p.m. de Zn pour la forme extractible par HCl dilué et 40 p.p.m. pour la forme totale extraite par HCl concentré (DARTIGUES et LUBET, 1967). Mais, pour les valeurs inférieures à ces seuils, ils constatent que les sols portent indifféremment des plantes carencées et des plantes saines ; même des sols ayant des réserves très faibles en zinc paraissent subvenir normalement aux besoins des plantes.

En déterminant parallèlement le pH des parcelles étudiées, DARTIGUES et LUBET ont remarqué que la connaissance de la réaction du sol associée à celle de la teneur en zinc extractible constitue un test très valable pour l'appréciation du sol à fournir le zinc au Maïs. Ainsi, pour les valeurs inférieures aux seuils précités, la carence zincique apparaîtra dans 9 cas sur 10, lorsque le pH du sol, déterminé en présence d'eau, est supérieur à 6,4 (*).

Cependant, ces tests ne se sont pas révélés utilisables pour le diagnostic de carences en zinc du Lin dans les sols de limon de la région parisienne (TROCMÉ, communication personnelle).

Dans les sols du Finistère, les taux de zinc extractible par HCl dilué sont faibles ; la teneur moyenne est de 2,3 p.p.m. de Zn et près de la moitié des terres analysées contiennent moins de 2 p.p.m. ; mais, jusqu'à présent, il n'est pas possible d'affirmer que le seuil de carence, établi pour les sols du Sud-Ouest, soit valable en Bretagne (COPPENET et MORÉ, communication personnelle).

## V. — BORE

Depuis l'observation déjà ancienne de la carence en bore sur Betterave, de nombreux travaux ont fait état d'accidents variés sur diverses plantes et sur différents types de sols. Parmi ces travaux, nous relevons ceux de BRANAS et BERNON (1954), CHABANNES (1958), JOUIS *et al.* (1960), DECAU (1960), TROCMÉ (1960), DECAU *et al.* (1962), GACHON (1963 et 1964) et COPPENET (1965).

Outre la Betterave, les espèces signalées comme étant le plus fréquemment atteintes sont le Rutabaga, le Navet, la Luzerne, le Céleri, le Chou-fleur, les arbres fruitiers et la Vigne. Chez ces espèces, les accidents de carence se traduisent très diversement ; ainsi, les principaux symptômes observés sont les suivants :

— Betterave : destruction des jeunes feuilles avec production de bourgeons axillaires,

(*) Depuis la rédaction de ce mémoire, DARTIGUES (1970) a proposé d'extraire le zinc du sol par l'acétate d'ammonium au pH du sol ; il situe le seuil de carence à 0,16 p.p.m.

— Rutabaga et Navet : formation de taches brunes et translucides à l'intérieur de la racine,

— Luzerne : jaunissement des feuilles terminales disposées en rosette et ramification de la tige.

— Céleri : rupture de nervures à la partie inférieure des pétioles,

— Chou-fleur : apparition de zones brunes et liégeuses dans l'inflorescence,

— Arbres fruitiers : coulure des fleurs, formation de liège interne dans les fruits à pépins, tuméfaction de l'écorce, etc.

— Vigne : décoloration entre les nervures principales, affaiblissement de l'extrémité des rameaux, coulure des grappes et formation de petits grains sans pépins.

Le test couramment appliqué pour diagnostiquer les cas de carence est celui du dosage du bore soluble à l'eau des sols. Cette forme du bore est obtenue généralement par extraction au moyen d'un réfrigérant à reflux, en utilisant un rapport terre/eau déterminé, mais variable suivant les auteurs, ce qui ne permet pas toujours de comparer les mesures enregistrées par différents laboratoires. Mais il est évident que cela n'aurait qu'un inconvénient limité si les différents auteurs trouvaient chacun de bonnes relations entre la technique utilisée et les accidents de carence. En fait, les résultats obtenus sont contradictoires si l'on considère l'ensemble des travaux effectués à l'échelle mondiale. Pour interpréter cette inconstance, il est possible de faire les remarques suivantes :

— l'alimentation des plantes en bore est sous la dépendance de facteurs climatiques. Ainsi, la sécheresse estivale favorise l'apparition de symptômes de carence (Decau, 1965).

— les teneurs en bore soluble sont susceptibles de présenter une variation au cours de l'année (Cornillon, 1967).

— la détermination du bore soluble pourrait ne pas suffire à elle seule dans la prévision d'une fumure boratée. Par exemple, faut-il tenir compte également du pH et du taux de matière organique ? C'est ainsi, par exemple, que Jouis *et al.* (1960) ont établi, en fonction du pH, une relation entre la teneur en bore soluble des sols de limon du pays de Caux et le seuil d'apparition de symptômes de carence en bore sur Betterave ou sur Lin ; ce seuil est de 0,10 p.p.m. B pour un pH de 6,8 et de 0,90 p.p.m. B pour un pH de 7,5. De même, à la suite d'expériences en pots dans des conditions d'humidité satisfaisantes et voisines, Maurice et Trocmé (1965) ont également repris l'hypothèse que le chaulage conduit à une augmentation des besoins en bore des plantes.

Il semble donc que la conduite de la fertilisation boratée demeure difficile à prévoir d'après la seule détermination de bore soluble à l'eau. Cependant, Basset (1961) observe que, pour des cultures maraîchères et fruitières de différentes régions de France, des teneurs en bore soluble inférieures à 0,6 p.p.m. conduisent avec une très grande probabilité à des carences.

## VI. — MOLYBDÈNE

Le premier cas de carence en molybdène a été remarqué sur des Choux-fleurs, dans le Languedoc (Lagaude, 1959). Ils ont ensuite été observés sur d'autres cultures maraîchères, en particulier sur Melon et sur Luzerne, dans le Bas-Rhône et le

Languedoc (HUGUET, 1961 ; RUTTEN, 1964), le Gers et le Tarn-et-Garonne (BESSON, 1962).

Jusqu'à présent, il n'a pas été remarqué de carence en molybdène sur des arbres fruitiers dans les conditions naturelles (TROCMÉ et GRAS, 1964).

Les symptômes sont caractérisés sur le Chou-fleur par l'atrophie du limbe et, dans les cas graves, il ne subsiste que la nervure principale de la feuille ; en outre, les pommes sont petites ou même inexistantes. Une alimentation insuffisante en molybdène se traduit sur Melon par une chlorose diffuse du limbe dès l'apparition des premières feuilles ; elle est rapidement suivie d'une nécrose marginale ; la croissance de la plante demeure réduite, la floraison est faible et la fructification très déficitaire.

Si, dans certains sols, le molybdène est présent en quantités insuffisantes pour les végétaux, dans d'autres sols, au contraire, sa teneur élevée provoque un enrichissement des plantes en molybdène et celles-ci deviennent toxiques pour les animaux. Ce phénomène a été observé, dans le Bassigny, sur les marnes liasiques. FLON a constaté que ces sols ont une teneur en molybdène total comprise entre 15 et 58 p.p.m. (PEDRO, 1968) ; elle est élevée par rapport aux valeurs citées dans la littérature ; par exemple, dans les sols de l'Aveyron, la teneur moyenne est de 0,87 p.p.m. (GODFRAIN, MILHAUD et de SAQUI-SANNES, 1965).

Il apparaît que le dosage du molybdène total permet de localiser les zones où ces toxicités naturelles risquent de se produire. Par contre, dans les cas de carences végétales, cette détermination ne paraît pas suffisante ; aussi, certains auteurs ont-ils expérimenté plusieurs réactifs en vue d'extraire une forme soluble de molybdène. Pour les sols d'Australie et de Nouvelle-Zélande, GRIGG utilise l'oxalate acide d'ammonium de pH = 3,3 et il constate que les sols réagissant positivement à un apport de molybdène contiennent moins de 0,15 p.p.m. de Mo soluble dans l'oxalate et ont un pH inférieur à 6,3 (GRIGG, 1953).

L'acétate d'ammonium neutre est aussi employé comme réactif d'extraction (MITCHELL, 1956 ; BERTRAND, 1962) ; c'est d'ailleurs avec ce dernier que MITCHELL obtient les meilleurs résultats pour le diagnostic des carences dans les sols d'Écosse. En revanche, dans les sols de Galice, PRIETO-BOUZA remarque que la solution d'acétate d'ammonium neutre n'extrait que de très faibles quantités de molybdène par rapport à la solution d'oxalate acide d'ammonium (PRIETO-BOUZA, 1960). Dans les sols de Bretagne, qui ont de nombreux points communs avec les sols de Galice, nous arrivons à des conclusions identiques ; en effet, les différents réactifs expérimentés : l'acétate d'ammonium neutre, l'acide acétique, le réactif acétoacétique Morgan-Barbier, l'eau, l'acide chlorhydrique dilué extraient des quantités de molybdène négligeables ou nulles, quel que soit le type de sol ; alors que la fraction soluble dans l'oxalate acide d'ammonium est toujours facilement mesurable et varie dans des proportions assez importantes (DUVAL, résultats non publiés). Mais actuellement, en l'absence d'expérience sur la réaction des plantes, nous ne savons pas si le seuil de carence établi par GRIGG est applicable aux sols du Massif armoricain.

## VII. — COBALT

Jusqu'à présent, le cobalt n'a pas été reconnu nécessaire aux plantes ; par contre, il est indispensable aux animaux, en particulier aux ruminants. Des carences en cobalt ont été signalées sur des bovins, dans des exploitations agricoles situées sur granite, en haute montagne vosgienne (MAROCKE, 1958).

Selon les zootechniciens, les symptômes de déficience en cobalt apparaissent sur les animaux quand les foins consommés contiennent moins de 0,07 à 0,08 p.p.m. de Co. La connaissance de ce seuil de carence peut permettre à l'analyse du sol de contribuer à la prévision d'une alimentation insuffisante en cobalt chez les animaux, dans la mesure où une relation peut être établie entre la teneur en cobalt du sol et celle des végétaux.

MAROCKE constate qu'il n'existe pas de relation directe entre la teneur en cobalt total du sol et la teneur en cobalt des fourrages (MAROCKE, 1958). En prenant comme critère l'apparition des troubles de carence chez les animaux mis au pâturage, en Grande-Bretagne, MITCHELL observe que la quantité de cobalt extraite par l'acide acétique à 2,5 p. 100 donne une indication valable sur les disponibilités d'un sol en cobalt (MITCHELL, 1956).

L'application de cette technique aux sols du Finistère a permis d'établir une relation entre la teneur en cobalt extrait par l'acide acétique et la teneur en cobalt des plantes (COPPENET et CALVEZ, 1967). Les dosages effectués sur les sols appartenant aux deux principaux types géologiques de la Bretagne : les granites et les schistes, ont montré que la teneur en cobalt est plus faible dans les sols granitiques que dans les sols schisteux ; les teneurs moyennes de cobalt extrait par l'acide acétique sont respectivement de 0,28 et de 0,56 p.p.m. La teneur en cobalt des végétaux est aussi plus faible sur les sols granitiques que sur les sols schisteux comme l'indiquent les valeurs du tableau ci-dessous :

| | | Teneur en cobalt des graminées fourragères en p.p.m. de Co | |
|---|---|---|---|
| | | Sols granitiques | Sols schisteux |
| Herbes au stade pâture | teneur moyenne | 0,097 | 0,141 |
| | extrêmes | 0,05 et 0,24 | 0,05 et 0,48 |
| Foins | teneur moyenne | 0,155 | 0,20 |
| | extrêmes | 0,05 et 0,35 | 0,04 et 0,60 |

Bien que ces résultats ne permettent pas de prédire la fréquence des carences en cobalt chez les ruminants, il apparaît cependant que les troubles dus à une déficience en cobalt seront, en Bretagne, statistiquement moins fréquents dans les zones schisteuses que dans les zones granitiques.

## CONCLUSION

L'analyse du sol, en vue de résoudre *le problème des carences* en oligo-éléments, est une opération de plus en plus sollicitée par les praticiens. La satisfaction de cette demande a été rendue possible, au moins partiellement, grâce aux progrès de la chimie analytique et au perfectionnement des instruments de mesures et par suite de l'établissement de bonnes corrélations entre les mesures de laboratoire et les seuils d'apparition de symptômes de carence. Des corrélations ont pu être établies pour des aires géographiques où les accidents de carence sont fréquents. C'est le cas notamment du fer pour le Sud-Est, du manganèse et du cuivre pour le Massif armoricain, du zinc pour le bassin de l'Adour et du bore pour le pays de Caux. Ainsi :

— dans le Sud-Est, le seuil de résistance à la chlorose des arbres fruitiers est situé vers 7 p. 100 de calcaire actif ;

— dans les sols de Bretagne, les carences risquent d'apparaître avec une forte probabilité sur céréales lorsque les teneurs en Cu total sont inférieures à 7-8 p.p.m. et lorsque les teneurs en Mn actif sont inférieures à 20-25 p.p.m. ;

— dans le bassin de l'Adour, les symptômes de carence en Zn apparaissent sur Maïs quand le pH eau est supérieur à 6,4 et le taux de Zn extrait par l'acide chlorhydrique dilué inférieur à 2,1 p.p.m. ;

— dans le pays de Caux, le seuil d'apparition de symptômes de carence en bore sur Betterave est lié à la fois à la teneur en bore soluble et au pH. Ce seuil serait, par exemple, de 0,10 p.p.m. B pour un pH de 6,8 et de 0,90 p.p.m. B pour un pH de 7,5.

Cependant, il est à craindre que les normes établies dans ces régions ne soient pas valables pour des conditions pédoclimatiques différentes. Mais pour diagnostiquer des cas de carence, les analyses comparées entre parties saines et malades fournissent, généralement, des indications utiles. C'est cette méthode, quoique nécessitant davantage de temps, qui apparaît alors comme la plus valable dans les régions où les accidents de carence ne se posant qu'avec une faible fréquence, il n'a pas été établi de seuil de carence.

Enfin, notons que le fait d'avoir établi des normes par référence à des carences n'entraîne pas obligatoirement la résolution du *problème de l'alimentation optimale* des plantes. Le problème des subcarences est, en effet, quelquefois posé mais on ne dispose pas encore de données sûres à partir d'essais en plein champ.

*Reçu pour publication en juin 1970.*

## SUMMARY

### DIAGNOSIS OF TRACE ELEMENTS DEFICIENCIES BY MEANS OF CHEMICAL ANALYSIS OF SOILS

Soil-analysis methods have been used in France in order to gauge the feeding of plant with trace elements. The purpose of the present paper is to examine the possibilities offered by these techniques.

*Iron.* — Determination of total iron or of free iron does not indicate the ability of a soil to supply this element to plants. On the other hand, the amount of lime extracted by ammonium oxalate does make it possible to check the tendency of soils to produce chlorosis. In the South-East, the threshold for resistance to chlorosis is about 7 p. 100 of the active limestone.

*Copper.* — In soils of the Armorican massif, weak reagents extract no copper ; but determination of total copper shows a relation between the appearance of deficiency symptoms and copper-content of the soil. The deficiency threshold lies between 7 and 8 p.p.m. of Cu.

*Manganese.* — Use of the acetoacetic reagent containing hydroxylamine hydrochloride enables a readily reducible form of manganese to be extracted. In the soils of Brittany, the deficiency threshold is around 20 p.p.m. of Mn when the water pH is about 6.0. Toxicity symptoms are liable to appear when the extracted manganese rises above 100 p.p.m. of Mn and water pH lies below 5.0.

*Zinc.* — Zinc is extracted either by hydrochloric acid diluted to give an extraction pH of 2, or by concentrated hydrochloric acid. In soils from the South-West, deficiency symptoms appear in maize when water pH is above 6.4 and the zinc is less than 3.3 p.p.m. of Zn extractable by dilute hydrochloric acid and less than 40 p.p.m. using concentrated hydrochloric acid.

*Boron.* — The reagent most often used for the extraction of boron from the soil is water. But more experimental work is needed to determine the deficiency threshold with different types of soil.

*Molybdenum.* — The various reagents studied (water, ammonium acetate, acetic acid, hydrochloric acid) extract negligible or zero quantities of molybdenum from soils of Brittany, while the fraction soluble in acid ammonium oxalate can be easily measured ; but it is not yet possible to state that the deficiency threshold found by GRIGG applies to these soils.

*Cobalt.* — In Brittany, there is a relationship between the cobalt extracted from the soil by acetic acid and the cobalt content of vegetation. Plants grown on granite soils contain less cobalt than plants from schistous soils.

## ZUSAMMENFASSUNG


### DIAGNOSE DER SPURENELEMENTEKARENZ ANHAND DER CHEMISCHEN BODENANALYSE.

In Frankreich wurden Verfahren der Bodenanalyse entwickelt, in der Absicht die Versorgung der Pflanzen mit Mikronährstoffen vorauszubestimmen. Der vorliegende Bericht will die durch diese Technik gegebenen Möglichkeiten untersuchen.

*Eisen.* — Die Bestimmung des gesamten Eisens oder des freien Eisens führt nicht dazu, die Fähigkeit des Bodens, Pflanzen mit diesem Element zu versorgen, zu erkennen. Dagegen ist der mittels Ammoniumoxalat ausgezogene Gehalt an kohlensaurem Kalk für die Chloroseerzeugung der Böden aussagekräftig. Im Südosten liegt die Widerstandsschwelle gegen Chlorose etwa bei 7 p. 100 aktivem kohlensaurem Kalk.

*Kupfer.* — In den Böden des Felsmassivs der Armorica extrahieren schwache Reagenzien das Kupfer nicht ; die Bestimmung des Gesamtkupfers erlaubt jedoch eine Beziehung zwischen dem Auftreten von Karenzsymptomen und dem Kupfergehalt des Bodens aufzustellen. Der Karenzschwellwert liegt zwischen 7 und 8 p.p.m. Kupfer.

*Mangan.* — Die Verwendung des Hydroxylaminchlorid enthaltenden, acetessigsauren Reagens gestattet es, eine leicht reduzierbare Form des Mangans auszuziehen. In den Böden der Bretagne liegt der Karenzschwellwert bei etwa 20 p.p.m. Mn, wenn der pH-Wert des Wassers grösser als 6,0 ist. Toxizitätserscheinungen sind zu erwarten, wenn das ausgezogene Mangan mehr als 100 p.p.m. Mn beträgt und der pH-Wert des Wassers unter 5,0 liegt.

*Zink.* — Wird entweder mit, auf pH 2 verdünnter, Salzsäure oder mit konzentrierter Salzsäure ausgezogen.

In den Böden des Südwestens erscheinen Karenzsymptome bei Mais, wenn der Wasser-pH-Wert grösser als 6,4 und der Zinkgehalt kleiner als 3,3 p.p.m. Zn, bei Auszug mit verdünnter Salzsäure und kleiner als 40 p.p.m., bei Auszug mit konzentrierter Salzsäure, ist.

*Bor.* — Das meist angewendete Reagens, um Bor aus dem Boden auszuziehen, ist Wasser. Die Bestimmung des Karenzschwellwertes für die verschiedenen Bodentypen bedarf jedoch noch experimenteller Untersuchungen.

*Molybdän.* — In den Böden der Bretagne ziehen die verschiedenen benutzten Reagenzien, d. h. Wasser, Ammoniumacetat, Essigsäure und Salzsäure nur unbedeutende Mengen oder gar kein Molybdän aus, während der in Ammoniumbioxalat lösliche Anteil leicht messbar ist. Es ist jedoch noch nicht möglich zu behaupten, dass der von GRIGG bestimmte Karenzschwellwert auf diese Böden anwendbar sei.

*Kobalt.* — In der Bretagne besteht eine Beziehung zwischen dem aus dem Boden durch Essigsäure ausgezogenen Kobalt und dem Kobaltgehalt der Pflanzen. Die auf Granitboden eingesammelten Pflanzen enthalten weniger Kobalt als Pflanzen, die auf Schieferboden gewachsen sind.

## РЕЗЮМЕ

*Диагностика недостаточности в микроелементах с помощью химического анализа почв.*

Л. ДЮВАЛЬ, Ж. МОРИС.

Во Франции выработанны методы анализа почв для предвидения необходимых подкормок растений микроелементами. Авторы рассматривают возможность практического применения такого рода анализов.

*Железо.* Определение общего и свободного железа в почве не позволяет установить способна-ли она питать растение этим элементом. И, напротив, при помощи процента кальция извлеченного щавелекислым аммонием, возможно судить о хлорозной способности почв. На юго-востоке порог хлорозостойкости находится приблизительно в пределах 7-ми % активного кальция в почве.

*Медь.* В почвах Арморикансного Массива невозможно извлечь медь с помощью слабых реактивов; но определение количеств общей меди позволяет установить связь между появлением признаков медной недостаточности, и содержанием этого элемента в почве. Порог недостаточности лежит между 7-ью и 8-ью ‰ меди в ней.

*Марганец.* Применение ацето-уксусного реактива содержащего хлоргидрат гидроксиламина позволяет экстракцию легко восстанавливаемой формы марганца. В почвах Бретани порог марганцевой недостаточности находится около 20-ти ‰ этого элемента, при pH выше 6,0. Явления токсичности могут появиться, когда количества экстрагированного марганца превышают 100 ‰ Mn и гидролитическая кислотность находится ниже 5,0.

*Цинк.* Извлекается разбавленной соляной кислотой, когда кислотность экстракции равна 2,0, или концентрированной соляной кислотой. В почвах юго-запада симптомы цинковой недостаточности появляются на кукурузе при гидролитической кислотности превышающей 6,4 и когда количество цинка экстрагируемого разбавленной соляной кислотой не превышает 3,3 ‰ а количества цинка извлекаемого концентрированной соляной кислотой — 40 ‰.

*Бор.* Вода является реактивом применяемым чаще других для экстракции бора почв. Но определение порога недостаточности этого элемента в разных типах почв требует еще изучения.

*Молибден.* В почвах Бретани, применявшиеся реактивы (вода, уксуснокислый аммоний, уксусная кислота, соляная кислота) извлекают ничтожные количества, или совсем не извлекают молибдена, в то время как фракция растворимая в щавелекислом аммонии с кислой реакцией, легко поддается измерению. Но невозможно еще утверждать, что порог недостаточности установленный Григгом, применим к почвам Бретани.

*Кобальт.* В повах Бретани существует зависимость между количеством кобальта экстрагированным из почвы с помощью уксусной кислоты и содержанием этого элемента в растениях. Растения собранные на гранитических почвах содержат меньше кобальта, чем растения со сланцевых почв.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


ANSELME C., BOURGEOIS M., 1958. Carence et maladie cryptogamique sur *Linum usitatissimun* *C. R. Acad. Agr.*, **44**, 195-200.

BARBIER G., CHABANNES J., TROCMÉ S., 1950. Sur un dépérissement de vergers aux environs d'Orléans. *C. R. Acad. Agr.*, **36**, 517-520.

BASSET M., 1961. Sur la teneur des sols en bore extractible à l'eau bouillante en relation avec l'état de santé des récoltes. *Adv. Hort. Sci., Applic.*, **1**, 229-235

BERTRAND D., 1962. De l'emploi pratique du molybdène comme engrais pour la culture du soja. *C. R. Acad. Sc.*, 2814-2816.

BESSON J., 1962. La carence en molybdène du melon. *Phytoma*, **134**, 27-28.

BRANAS J., BERNON G., 1954. Le plomb de la vigne, manifestation de la carence de bore. *C. R. Acad. Agr.*, **40**, 593-596.

CHABANNES J., TROCMÉ S., BARBIER G., 1949. Observations sur la carence zincique du pommier. *C. R. Acad. Agr.*, **35**, 624-626.

CHABANNES J., 1958. Enquête sur les conséquences éventuelles d'applications répétées de borate aux terres cultivées. *C. R. Acad. Agr.*, **44**, 440-447.

COÏC Y., COPPENET M., 1958. Sur la carence en manganèse des céréales dans les sols humifères de Bretagne. *Ann. Physiol. vég.*, suppl. II, 111-138.

COPPENET M., JOLIVET E., 1952. Détection de graves carences en cuivre dans les terres très humifères du centre de la Bretagne. *C. R. Acad. Agr.*, **38**, 691-693.

COPPENET M., CALVEZ J., 1955. Sur l'origine des carences en cuivre des sols de Bretagne. *C. R. Acad. Sc.*, **241**, 1068-1070.

COPPENET M., 1956. En Bretagne, deux oligo-éléments d'importance. *Bull. Tech. Inf.*, **108**, 155-163.

COPPENET M., 1959. Le manganèse dans les sols de Bretagne et ses relations avec la croissance des végétaux. *Ann. agron.*, **2**, 155-218.

COPPENET M., 1965. Observations sur les carences en bore existant en Bretagne. *C. R. Acad. Agr.*, **51**, 140-149.

COPPENET M., DUVAL L., 1965. Détection de carences en zinc sur maïs dans le Finistère. *C. R. Acad. Agr.*, **51**, 449-456.

COPPENET M., CALVEZ J., 1967. Les oligo-éléments et, en particulier, le cobalt dans les sols et les fourrages du Finistère. *C. R. Acad. Agr.*, **53**, 939-947.

CORNILLON M., 1967. Observations sur les possibilités de solubilisation du bore dans les sols. *Sci. Sol*, **1**, 81-91.

DARTIGUES A. 1970. Contribution à l'étude de la mobilité de la réserve en zinc du sol. Application à l'alimentation du Maïs dans le sud-ouest atlantique. *Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Bordeaux*, 109 pp.

DARTIGUES A., LUBET E., 1967. Relation entre le pH du sol et la manifestation de la carence en zinc du maïs dans un secteur du bassin de l'Adour. Possibilités et limites d'un diagnostic par l'analyse du sol. *Ann. agron.*, **18**, 285-299.

DECAU J., 1960. Premières observations de carence en bore sur les terrasses de la moyenne Garonne. *C. R. Acad. Agr.*, **46**, 1002-1008.

DECAU J., DUCOS R., PÉRODEAU J., PUJOL B., 1962. Nouvelles observations de carence en bore dans la région toulousaine. Carence de la vigne en sols argileux et argilo-calcaires formés sur molasses miocènes. *C. R. Acad. Agr.*, **48**, 733-737.

DECAU J., 1965. Contribution à l'étude des conditions pédologiques et climatiques d'alimentation boratée de la luzerne dans des sols argilo-calcaires du sud-ouest de la France. *Sci. Sol.*, **2**, 121-134.

DELMAS H. G., BERNHARD R., 1951. La carence en zinc des arbres fruitiers. *Bull. Techn. Inf.*, **60**, 365-373.

DELMAS H. G., 1953. Sur un cas de dépérissement des pommiers dans la Haute-Vallée du Tech. *C. R. Acad. Agr.*, **39**, 473-476.

DELMAS H. G., 1955. Le dépérissement des cerisiers de la région de Céret. *C. R. Acad. Agr.*, **41**, 333-337.

DROUINEAU G., 1941. Une méthode rapide d'appréciation du pouvoir chlorosant des sols calcaires. *C. R. Acad. Agr.*, **27**, 1132-1137.

DROUINEAU G., 1942. Dosage rapide du calcaire actif des sols. Nouvelles données sur la répartition et la nature des fractions calcaires. *Ann. agron.*, **12**, 441-450.

DROUINEAU G., 1949. L'arboriculture fruitière et les problèmes agronomiques particuliers aux sols calcaires. *Bull. Techn. Inf.*, **41**, 343-349.

DROUINEAU G., MAZOYER R., 1954. Carence du framboisier en manganèse. *Ann. agron.*, **5**, 844-845.

DUVAL L., 1962. Sur les caractères pédologiques et agronomiques des sols gréseux du nord de la Mayenne. *Bull. Mayenne-Sciences*, 66-82.

DUVAL L., 1963. Existence de graves carences en cuivre dans les sols gréseux de la Basse-Normandie et du Bas-Maine. *C. R. Acad. Agr.*, **49**, 1216-1220.

DUVAL L., 1967. Sur la teneur en cuivre des sols granitiques de la Basse-Normandie et du Bas-Maine. *Bull. Mayenne-Sciences*, **2**, 91-98.

FLON H., 1959. cité par PEDRO G. (1968).

GACHON L., 1963. Carence en bore sur pommier *Reinette blanche du Canada*. *94e Congrès pomologique*. Bordeaux, 112-118.

GACHON L., 1964. Carence en bore observée sur luzerne en sol granitique de l'Auvergne. *C. R. Acad. Agr.*, **50**, 210-215.

GEOFFRION, 1957. La carence en zinc de la *Golden Delicious*. *Phytoma*, **93**, 35-36.

GEOFFRION, 1962. La carence en cuivre du pommier. *Phytoma*, **140**, 15.

GODFRAIN J. C., MILHAUD G., de SAQUI-SANNES P., 1965. Dosage du molybdène dans les échantillons de sol, de végétaux et de tissus animaux provenant du département de l'Aveyron. *Rev. Méd. Vét.*, **116**, 169-192.

GRIGG J. L., 1953. Determination of the available molybdenum of soils. *New. Zeal. J. Sc. Techn.*, **34**, 405-414.

HUGUET F., 1961. Observations sur la carence en molybdène. *C. R. Trav. Sta. agron. I.N.R.A*, 13 D.

JOUIS E., LECACHEUX M. T., CAUCHY F., 1960. Influence du pH sur la carence en bore des betteraves et des lins dans les sols de limon du pays de Caux. *C. R. Acad. Agr.*, **46**, 248-253.

LAGAUDE V., 1959. Une maladie de carence du chou-fleur. *Phytoma*, **108**, 33-34.

LIWERANT J., 1960. Relations entre la chlorose des arbres fruitiers et la réaction des sols. *C. R. Acad. Agr.*, **46**, 352-358.

MAROCKE R., 1958. Carence présumée en cobalt des fourrages produits en haute-montagne vosgienne. *Chim. Ind.*, **79**, 782-784.

MAURICE J., TROCMÉ S., 1965. Observations sur le bore dans le sol et dans les plantes. II — Influence de l'apport d'amendements calcaires sur le bore préexistant ou ajouté dans le sol. *Ann. agron.*, **16**, 579-593.

MITCHELL R. L., 1956. Analyse des sols et oligo-éléments. *Organisation et rationalisation de l'analyse des sols*. O. E. C. E., Paris, 149-163.

PEDRO G., 1968. La prospection géochimique des éléments-traces dans les sols avec établissement de cartes géochimiques superficielles (son utilisation en métallogénie et son intérêt en agronomie). Rapport interne, I.N.R.A, pp. 71.

PRIETO-BOUZA A., 1960. Molibdeno total y asimilable en suelos de prado gallego. *Bol. Univ. Compost.* 68-69, 223-342.

REDLICH G. C., 1954. Les problèmes de la culture des sables des Landes. *Bull. C. E. T. A.*, **15**, 149-151.

ROUTCHENKO W., 1961. Détermination d'une carence en zinc sur maïs. *C. R. Acad. Agr.*, **57**, 739-741.

RUTTEN P., 1964. Relations entre les accidents de végétation dans la région du Bas-Rhône-Languedoc. *95e Congrès Pomologique*, 118-123.

TROCMÉ S., 1960. Magnésie et oligoéléments en arboriculture fruitière. *Journée fruitière régionale D. S. A. Drôme*, 17-23.

TROCMÉ S., BARBIER G., CHABANNES J., 1950. Recherches sur la chlorose par carence de manganèse des cultures irriguées à l'eau d'égout. *Ann. agron.*, série A, 663-685.

TROCMÉ S., GRAS R., 1964. *Sol et fertilisation en arboriculture fruitière*, 1 vol., Perrin G. M., édit., Paris.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (5), 587-601.

# EXEMPLES DE PROBLÈMES RÉGIONAUX

## I. — Le massif armoricain

M. COPPENET

*Station d'Agronomie,*
*Boulevard Kerguélen, 29 S - Quimper*
*Institut national de la Recherche agronomique*

RÉSUMÉ

Le Massif armoricain, au climat atlantique marqué, est formé de roches granitiques et de schistes primaires dépourvus de calcaire. Les sols sont très riches en matières organiques, peu profonds, faiblement pourvus en argile et très sableux, surtout sur les granites. Les granites à dominante de mica blanc ainsi que les grès quartzeux sont très pauvres en cuivre, alors que la pratique du chaulage, indispensable pour réussir de nombreuses cultures, favorise les carences en manganèse, en bore et en zinc.

L'incidence de ces diverses carences d'oligo-éléments sur les productions agricoles de ces régions est passée en revue :

Production céréalière, blé, orge, avoine (carences en manganèse et en cuivre). Production du maïs (carence en zinc). Graminées fourragères (carence en cuivre). Légumineuses fourragères (carence en cuivre). Betteraves, rutabagas et navets (carence en bore). Cultures maraîchères de plein champ (carences en cuivre et manganèse). Enfin, on donne les relations entre les teneurs en cuivre et en cobalt des sols et les teneurs en cuivre et en cobalt de la matière sèche des ray-grass qui ont poussé sur ces sols.

Le Massif armoricain s'étend, outre la Bretagne, sur des régions plus orientales : la Basse-Normandie, le Bas-Maine, le Bocage angevin et le Bocage vendéen. Il englobe une grande partie de la presqu'île du Cotentin et ses limites sont sensiblement jalonnées par les villes de Saint-Lô, Alençon, Angers, Parthenay, Les Sables-d'Olonne.

Les roches granitiques sont abondantes sur ce vaste territoire, mais les schistes briovériens et primaires le sont encore beaucoup plus. Les roches métamorphiques — gneiss et micaschistes — sont bien représentées, sans oublier les recouvrements de limons comme ceux du nord-Finistère et du bassin de Rennes ainsi que les grès quartzeux primaires. Les affleurements de roches plus basiques — amphibolites, pyroxénites, serpentines — sont très limités.

Le climat, fortement atlantique à la pointe de Bretagne, le devient beaucoup moins dans les régions de Rennes ou de Laval. Le tableau ci-dessous réunit quelques caractéristiques permettant de mieux situer le climat de l'ensemble du Massif armoricain.

| | FINISTÈRE | Région LAVAL-MAYENNE |
|---|---|---|
| Hauteur d'eau annuelle (mm) | 800-1 500 | 700-800 |
| Évapotranspiration potentielle annuelle (mm) | 600-700 | 650-750 |
| Température moyenne annuelle (°C) | 10-12 | 9-11 |
| Nombre de jours de gelée par an | 30-35 | 45 |
| Température moyenne de janvier (°C) | 5-7 | 4,5-5,5 |
| Température moyenne de juillet (°C) | 16,5-17,6 | 18-18,5 |
| Écart juillet-janvier (°C) | 10-11,5 | 13-14 |

Le Finistère a donc des hivers nettement moins rigoureux que la région Laval-Mayenne et l'excédent des pluies sur l'évapotranspiration potentielle y est très important (COPPENET, 1969 *a* ; CORILLION, 1962).

L'absence de calcaire dans le sous-sol du Massif armoricain fait que les problèmes posés aux agronomes de ces régions sont des problèmes de sols acides. En Bretagne occidentale, c'est-à-dire dans les départements du Finistère, des Côtes-du-Nord et du Morbihan, une caractéristique marquante des terres arables réside en leur richesse en matière organique, les teneurs en azote total étant souvent comprises entre 2,5 et 3,5 p. 1 000. Ces teneurs si élevées peuvent s'expliquer par le fait d'une mise en culture récente, mais aussi par le climat humide et modérément chaud en été, qui ne favorise pas la destruction rapide des débris végétaux. Les roches cristallines fourniront des sols sableux, pauvres en argile, les roches schisteuses des sols mieux pourvus en argile et surtout en limons. D'une manière générale, tous ces sols seront faciles à travailler et filtrants, aidés en cela par le fort taux d'humus dont nous venons de parler (COPPENET, 1967).

Le département de la Loire-Atlantique possède des sols moins riches en matière organique ; ce département a été étudié, en particulier, par BOUVATTIER de la Station agronomique de Nantes (BOUVATTIER, 1960).

Sous la lande d'éricacées, la forêt feuillue ou mixte, les débris végétaux s'accumulent par suite d'une mauvaise décomposition due à l'absence de températures estivales élevées jointe à un degré hygrométrique élevé en permanence. Cette accumulation des débris végétaux conduit à la formation d'un humus de type « *Moder* ». Cet humus est très acide, pH ($H_2O$) = 4, avec un rapport carbone sur azote de 15 à 20. Dans le cas des très vieilles landes ou des bois de conifères, il se forme un véritable « *humus brut* » ou « *mor* » dont les caractères de mauvaise incorporation sont encore plus accusés. Ces humus très acides exercent, bien entendu, leur action podzolisante, mais cette action est de faible amplitude ; on remarquera, par exemple, des poches cendreuses ainsi qu'une individualisation du fer et des acides humiques commençant à migrer ; les poches cendreuses se réunissent souvent en un véritable horizon $A_2$ continu, mais de 2 à 3 cm d'épaisseur. Le groupe pédologique auquel

appartiennent ces sols est le « *groupe podzolique* ». Comme les phénomènes de migration des oxydes de fer, de l'argile ou de la matière organique sont de faible amplitude et n'intéressent que les premiers centimètres du profil, le labour suffit à rendre homogène l'horizon 0-20 cm et le profil entier devient uniforme avec les caractères d'un « sol brun acide ».

Sur les roches les plus siliceuses, grès, quartzites, cailloutis, parfois granulite, se développent de véritables podzols humo-ferrugineux avec horizon cendreux $A_2$ de 20 cm d'épaisseur au moins, mais ces sols présentent déjà de mauvais caractères culturaux, ne serait-ce que par la présence de nombreux cailloux. Les vrais podzols ne se forment qu'à partir de matériaux très perméables.

L'indice d'entraînement de l'argile dans les sous-sols cultivés (25-50 cm) est égal à 1 pour atteindre au maximum 1,3, ce qui peut surprendre lorsque l'on connaît l'importance de l'eau drainante ; cependant, il ne faut pas oublier :

1° le faible taux d'argile surtout en sol granitique,
2° la très bonne structure grumeleuse des horizons superficiels,
3° une acidité souvent excessive qui maintient les colloïdes floculés,
4° des chutes de pluie régulières sans précipitations brutales.

Les limons éoliens, acides eux aussi, peuvent, par contre, présenter un horizon profond enrichi en argile. Ce type de sol existe sur le littoral nord de la Bretagne où il a donné lieu à l'implantation des premières cultures légumières.

Du point de vue des oligo-éléments, on peut prévoir que les roches cristallines et les grès quartzeux seront faiblement minéralisés et, aussi, que les pratiques indispensables du chaulage et des forts apports phosphatés seront des facteurs favorables à la diminution de solubilité de nombreux éléments au sein des sols.

Pays de bocage, les régions armoricaines sont, traditionnellement, des régions d'exploitations familiales de polyculture-élevage avec cultures de céréales, de pommes de terre, de betteraves, de choux-fourragers, les prairies naturelles occupant le fond des nombreuses petites vallées. Depuis une dizaine d'années, on a assisté à une diminution considérable du blé et de l'avoine au profit de l'orge et du maïs, l'intensification herbagère se portant, essentiellement, sur le ray-grass italien. La zone maraîchère côtière du nord-Finistère (Saint Pol-de-Léon, Roscoff) avec ses choux-fleurs et ses artichauts a progressé vers l'intérieur et des efforts sont faits en vue de rechercher des cultures nouvelles.

C'est au lendemain de la Seconde Guerre mondiale que la Station d'Agronomie de l'I. N. R. A., à Quimper, a eu l'attention attirée par des dépérissements graves de céréales et, en 1948, Coïc commence ses études sur les causes et les modes de traitement des carences en manganèse sur avoine, orge ou blé dans les conditions du Finistère.

En 1952, Coppenet et Jolivet détectent des carences cupriques interdisant la culture du blé, de l'orge, du trèfle violet dans certains champs. Vers 1960, Duval étend ces dernières observations à la Basse-Normandie et au Bas-Maine.

Avec l'apparition de la culture du maïs, Coppenet et Duval signalent, en 1964, les premières carences zinciques observées en Bretagne sur cette plante. Cette déficience, très fréquente en Bretagne occidentale, ne se manifeste pas là de manière particulière, elle existe aussi en d'autres régions françaises, contrairement aux carences en manganèse et cuivre.

La carence en bore ne se manifeste pas non plus de manière particulière dans les régions armoricaines, mais des observations et essais ont, cependant, été faits entre 1959 et 1965 dans le but de mieux connaître ses manifestations sur les betteraves, rutabagas et navets.

Des analyses récentes ont établi une relation entre la nature géologique des roches, la richesse en cobalt des sols et la richesse en cobalt des fourrages correspondants. Les conséquences de ce travail sont, naturellement, importantes du point de vue zootechnique.

Nous examinerons, à présent, par production, l'incidence des carences d'oligo-éléments dans les conditions actuelles de la pratique agricole.

## BLÉ, ORGE, AVOINE
## (CARENCES EN MANGANÈSE ET EN CUIVRE)

Sur les terres granitiques de la Bretagne occidentale (30 p. 100 des surfaces environ), particulièrement riches en matières organiques, dès que le chaulage porte le pH ($H_2O$) de la couche arable au-dessus de 6,0, l'alimentation manganique des plantes les plus sensibles à la carence de cet élément devient déficiente. Les signes caractéristiques de la « faim de manganèse » apparaissent sur avoine, blé ou orge ; la mort de la plante peut en résulter. Nous avons souligné dans des publications antérieures le fait qu'existe une gamme très étendue de manifestations de cette carence sur les céréales depuis la présence de quelques symptômes foliaires sans gravité jusqu'à la disparition totale de la culture. Les circonstances favorisant cette maladie de carence, outre l'élévation du pH, sont : le faible taux de manganèse total des roches granitiques, la forte teneur en substances organiques capables d'enrober les particules d'oxydes et, enfin, la texture sableuse et légère de ce type de sol favorisant une forte aération donc un déplacement des équilibres d'oxydo-réduction vers les formes de manganèse les moins solubles.

En sols schisteux ou métamorphiques, mieux pourvus en manganèse total, de structure plus lourde et moins bien pourvus en matière organique, les carences de manganèse sont plus rares mais existent cependant.

La fréquence de ces accidents était très grande, il y a quinze ans dans le Finistère, les Côtes-du-Nord et le Morbihan. A cette époque, au lendemain de la guerre qui avait créé de difficiles conditions d'approvisionnement en calcaires marins, les agriculteurs ont largement utilisé ces amendements calcaires sans contrôle analytique et, du fait de l'épandage à la main, une mauvaise répartition sur la parcelle en est résultée.

Aujourd'hui, l'importance des pulvérisations de sulfate de manganèse nécessaires aux céréales a sensiblement diminué : l'avoine, céréale la plus sensible, est moins cultivée, le contrôle des doses d'amendements calcaires est mieux fait et les analyses de sols plus largement répandues. Autre facteur, la substitution du tracteur au cheval, qui donne des sols plus tassés, donc plus favorables à l'assimilabilisation des oxydes de manganèse. Ces différents moyens préventifs étant mis en œuvre, le moyen curatif le plus efficace et le plus économique consiste à pulvériser sur la céréale, dès apparition des symptômes pathologiques, des solutions de sulfate de manganèse à 0,5 p. 100 non neutralisées. Les enfouissements de sels ou d'oxydes

de manganèse apportant 200 kg de Mn par hectare n'entraînent qu'une guérison temporaire des sols, d'une durée d'un an. Certaines variétés d'avoine souffrent moins de la carence en manganèse mais aucune d'entre elles ne présente de résistance suffisante. Si la teneur en « Mn actif » de la terre fine est inférieure à 20 p.p.m. pour un pH supérieur à 6,0, on peut supputer une déficience, d'où l'intérêt de compléter l'analyse chimique habituelle de terre par cette détermination (Coïc et Coppenet, 1949, 1952, 1958).

Les sols formés sur les granites et granulites de Bretagne occidentale ainsi que sur les grès quartzeux de tout le Massif armoricain sont incapables de donner une récolte normale de blé ou d'orge. On assiste alors à une disparition totale de ces cultures après le stade du tallage tant que la couche arable n'a pas reçu l'équivalent de 8 kg/ha de cuivre métal. L'avoine cultivée dans les conditions de ces sols carencés fournit de la paille mais pas de grain. Ces accidents apparaîtront, bien sûr, à la mise en culture de landes ou de bois, mais également dans d'innombrables parcelles cultivées depuis fort longtemps mais n'ayant jamais reçu de pulvérisations cupriques fongicides contre le mildiou de la pomme de terre. Les cartes 1 et 2 précisent les zones originellement dépourvues de cuivre où des carences cupriques ont été effectivement diagnostiquées, soit par l'examen des cultures, soit par l'analyse chimique du sol.

Fig. 1. — *Sols pauvres en cuivre et en cobalt*

Les pulvérisations foliaires de sels de cuivre sur les céréales malades provoquent un certain reverdissement et renouveau de végétation, mais il y a des brûlures pour des solutions très diluées (1 p. 1 000), si l'on ne neutralise pas. En présence d'une culture carencée, il faut conseiller une pulvérisation d'oxychlorure de cuivre (15 kg/ha) qui ne provoque pas de brûlures, fournit une petite quantité de cuivre soluble au

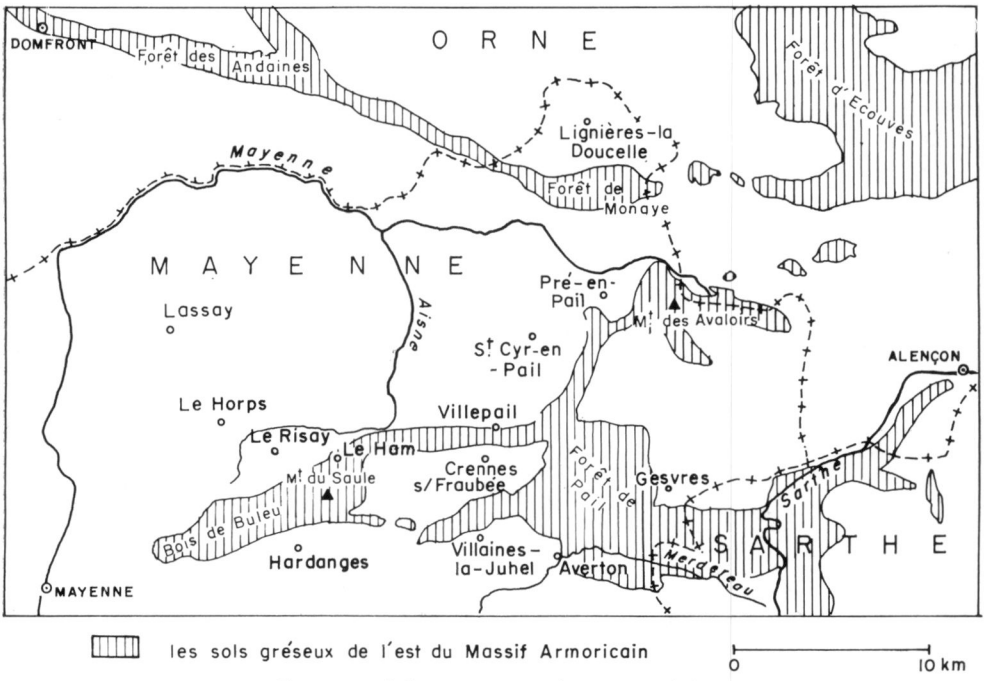



FIG. 2. — *Sols pauvres en cuivre et en cobalt*

feuillage et, surtout, laisse au sol un résidu capable de le guérir. Le meilleur moyen consiste, cependant, à enfouir 30 kg/ha de sulfate de cuivre, avant les semis, pour obtenir la guérison de nombreuses récoltes à venir. Notre expérience ne nous permet pas de dire au bout de combien d'années il est nécessaire de renouveler cette dose. En Bretagne, depuis quinze ans, le commerce a livré des tonnages importants de sulfate de cuivre aux agriculteurs des régions granitiques, au point que leur paysage s'en est trouvé modifié, comme cela a été remarqué par les géographes (GAUTHIER, 1963). La culture du seigle, seule possible jusque-là, a pratiquement disparu au profit des autres céréales ; le trèfle violet, le petit pois de conserve ont pu faire leur apparition alors que, dans le même temps, régressaient les surfaces occupées par l'ajonc, la bruyère, la fougère (COPPENET et CALVEZ, 1955 et 1956 ; DUVAL, 1963).

Grâce aux analyses de sol et aux visites de culture que peuvent faire les techniciens et conseillers agricoles, l'agriculteur breton peut prévoir, reconnaître et traiter les carences en cuivre et en manganèse de ses orges, blés et avoines. Il sera malheureusement souvent confronté avec un problème plus grave et sans solution pratique dans l'immédiat : celui du piétin-échaudage pour lequel des expérimentations sont actuellement poursuivies.

Voici un tableau permettant la comparaison des carences en manganèse et des carences en cuivre :

| | Carence en manganèse | Carence en cuivre |
|---|---|---|
| Conditions d'apparition | pH > 6,0 « Mn actif (1) < 20 p.p.m. Surtout sols granitiques mais existe aussi sur schistes | Uniquement sur sols gréseux et granitiques (granite à mica blanc dominant) Cu total (2) < 7 p.p.m. |
| Plantes très sensibles | Avoine, orge, blé, seigle | Orge, blé, avoine, trèfle violet, petit pois. |
| Symptômes | *Avoine, blé* : nécrose au milieu de la longueur des feuilles. *Orge* : petites taches brunes alignées le long des nervures. | Décoloration des extrémités des plus jeunes feuilles (maladie des bouts blancs). |
| Traitement pratique | Pulvérisation foliaire $MnSO_4$ 0,5 % : 600 à 1 000 l/ha | Enfouir 30 kg/ha $CuSO_4$, 5 $H_2O$ pulvérisation foliaire oxychlorure de cuivre à 1,5 % : 1 000 l/ha |
| Traitement préventif | Modérer les chaulages semer en sol assez tassé | |

(1) Mn actif = Mn facilement réduit par le chlorhydrate d'hydroxylamine.
(2) Cu total = Cu extrait par le mélange des acides nitrique et perchlorique.

Dans le but de donner une idée des chutes de rendement occasionnées par ces accidents, voici quelques résultats expérimentaux enregistrés dans la région de Quimper :

*Carence en manganèse*

| | | Rendements en q/ha | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Grain | | Paille | |
| | | Sans Mn | Avec Mn (1) | Sans Mn | Avec Mn (1) |
| *Essai* n° 1 sur avoine (1950) | Variété *Multigrap* | 4,0 | 14,0 | 8,8 | 23,2 |
| | Variété *Aigle* | 5,8 | 18,6 | 15,2 | 31,4 |
| *Essai* n° 2 sur avoine (1950) | Variété *Multigrap* | 6,4 | 16,0 | 21,4 | 32,0 |
| | Variété *Ligowo* | 9,6 | 16,0 | 29,6 | 34,4 |
| | Variété *Victoire* | 10,8 | 17,6 | 30,4 | 32,8 |

(1) Il s'agit d'un enfouissement de 50 kg/ha de $SO_4Mn$, $H_2O$ qui a laissé subsister des symptômes de carence ; nous savons, en effet, aujourd'hui, cette dose insuffisante. Les accroissements de rendement sont, cependant, considérables.

*Carence en cuivre*

| | Rendements en q/ha | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Grain | | Paille | |
| | Sans Cu | Avec Cu (1) | Sans Cu | Avec Cu (1) |
| Blé, 1954 : variété *Cappelle* | 0,8 | 17,6 | 5,5 | 56,4 |
| Avoine, 1954 : variété *Multigrap* | 2,3 | 10,0 | 4,3 | 48,0 |
| Blé, 1955 : variété *Cappelle* | ≠ 0 | 48,0 | | |
| Orge, 1955 : variété *Rika* | 0 | 18,0 | 0 | 52,0 |

(1) Les doses de sulfate de cuivre enfouies avant les semis étaient, respectivement de 100 kg/ha, 100 kg/ha, 50 kg/ha et 25 kg/ha. Ces doses étaient suffisantes pour éliminer tout symptôme de carence, mais si certains rendements restent trop faibles ceci provient d'autres facteurs tels que la pauvreté en éléments majeurs et le manque de profondeur des sols.

## MAÏSICULTURE (CARENCE ZINCIQUE)

La sélection par l'I. N. R. A. de variétés adaptées à la région a permis l'introduction, puis une extension extrêmement rapide des cultures, à la fois pour l'ensilage et pour le grain. Dès 1964, nous avons pu observer de nombreuses parcelles présentant des signes de carence zincique plus ou moins graves avec chutes de rendement et retards de maturité (COPPENET et DUVAL, 1964). Chaque année depuis cette date, des parcelles sont ainsi touchées, alors que la carence magnésienne est très rare. L'origine géologique du terrain ne semble pas avoir d'incidence dans l'apparition de la carence en zinc, mais ce sont les parcelles les mieux chaulées (pH > 6,5) et les mieux phosphatées ($P_2O_5$ citrique > 300 p.p.m.) qui sont les plus touchées. La localisation d'une partie des engrais phosphatés étant indispensable à un démarrage rapide et à une légère avance de la maturité du grain, nos observations n'ont pas montré un effet défavorable de cette pratique sur l'assimilation du zinc par le maïs. La Station de Quimper doit commencer les dosages de zinc soluble dans HCl dilué, afin de prévoir, par l'analyse des sols, les carences qui, par ailleurs, sont facilement décelées à l'examen des cultures. Les pulvérisations de sulfate de zinc à 1 p. 1 000 non neutralisé sont pratiquées couramment, avec succès, sans grand risque de brûlures foliaires, mais une guérison définitive des parcelles carencées nécessite, dans ces sols humifères, des enfouissements d'au moins 75 kg/ha. Il est possible, cependant, d'envisager des apports de sels de zinc moins élevés, soit avec les engrais liquides N.-P. utilisés dans certaines exploitations, soit par petites doses, mais en localisant au moment des semis.

La toxicité du sulfate de zinc n'est pas à craindre pour des doses de l'ordre de 1 t/ha, ni sur maïs, ni sur pomme de terre, comme nous l'ont indiqué des essais effectués en 1969.

A titre d'exemple, voici les résultats d'un essai poursuivi à Riec-sur-Belon (Finistère), en 1966, sur une parcelle reconnue l'année précédente comme fortement carencée :

| | Observations du 20 juin | Observations du 4 août | Rendements en q/ha | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Grain | Paille |
| Témoin | Carence grave | Pas de fleurs mâles visibles | 74,8 | 45,7 |
| 25 kg/ha $SO_4Zn$ | Nombreux symptômes | Quelques fleurs mâles visibles | 77,5 | 50,0 |
| 50 — | Carence légère | Plus de 50 % de fleurs visibles | 79,7 | 51,5 |
| 100 — | Plantes normales | Plus de 50 % de fleurs visibles | 83,2 | 53,4 |

## GRAMINÉES FOURRAGÈRES (CARENCE CUPRIQUE SURTOUT)

Là où les céréales périclitent selon les modalités définies ci-dessus, il arrive que les graminées fourragères soient touchées elles aussi, bien que nettement plus résistantes. C'est dans les cas des déficiences cupriques les plus accentuées qu'apparaissent, sur ray-grass, les « bouts blancs » caractéristiques des plus jeunes feuilles. Les massifs gréseux de l'est du Massif armoricain sont particulièrement pauvres en cuivre et nous ont permis l'observation de signes pathologiques caractéristiques et graves sur ray-grass et fléole. L'enfouissement de sels de cuivre, conseillé pour les céréales, sera, bien entendu, valable ici ainsi que pour les diverses cultures.

Dans les zones d'un champ vraiment surchaulées, les graminées fourragères ne manifestent pas de symptômes de carence en manganèse mais la teneur de leur matière sèche est fortement abaissée en cet oligo-élément.

## LÉGUMINEUSES FOURRAGÈRES (CARENCE CUPRIQUE SURTOUT)

Le trèfle violet semé en sol pauvre en cuivre lève mal, se développe mal et ne donne aucune repousse après une première coupe. Le trèfle incarnat et le trèfle blanc souffrent beaucoup moins de cette carence. La luzerne, peu cultivée en régions granitiques, serait touchée par la carence comme nous l'a montré un essai en pots.

En zones surchaulées, les trèfles chlorosent par suite d'une déficience en manganèse ; un trèfle incarnat croissant dans ces conditions a reverdi après pulvérisation de sulfate de manganèse mais ces phénomènes sont très limités dans leur importance agronomique. Limités aussi semblent être les effets positifs de l'incorporation de bore ou de molybdène au sol des luzernières.

## BETTERAVES, RUTABAGAS, NAVETS (CARENCE EN BORE)

Si la carence en bore de la betterave ne se présente pas en Bretagne différemment des autres régions françaises, nous avons, cependant, tenu à préciser un certain nombre de points qui sont développés dans une note à l'Académie d'Agriculture et dont voici le résumé (COPPENET, 1965).

L'enquête a porté sur une partie du Finistère et des Côtes-du-Nord où l'on cultive, aujourd'hui, beaucoup de variétés danoises riches en matière sèche (15 à 18 p. 100). Les prospections révèlent qu'on ne trouve guère plus de la moitié des champs absolument indemnes de signes de carence et qu'il y a environ un champ sur cinq atteint de carence grave justifiant pleinement une fertilisation boratée, les variétés rouges étant beaucoup plus sensibles que les variétés jaunes ou blanches. Les symptômes de carence ont été décrits en détail ; enfin, si l'élévation du pH des sols accroît le nombre de plantes carencées, on trouve des betteraves malades même à pH voisin de 5,0. Les chutes de rendement atteignent 10 p. 100 pour les racines, 20 à 30 p. 100 pour les feuilles et collets. Les teneurs en bore soluble à l'eau bouillante (rapport terre sur eau = 1/2) donnent, pour ces régions, des valeurs comprises entre 0,25 et 0,55 p.p.m. avec une moyenne de 0,38 p.p.m. Ces déterminations ne nous permettent pas, dans l'état actuel des choses, de prévoir la nécessité de compléments boratés (voir l'étude de DUVAL et MAURICE dans ce numéro). L'incorporation au sol par façons superficielles, une à deux semaines avant le semis, de 22 à 25 kg/ha de borate de soude à 11,3 p. 100 de bore est valable dans ces régions pour une guérison voisine de 100 p. 100. Au cas où ce traitement n'aurait pas été fait, il est encore possible d'effectuer une pulvérisation foliaire de pentaborate de soude (18,2 p. 100 de bore) en solution à 2 p. 1 000. Il a été obtenu, en 1962, un bon résultat en pulvérisant le 15 juillet, 2 000 litres par hectare d'une solution à 3 p. 1 000. A cette époque, les signes de carence ne sont pas encore visibles, mais cette date correspond à la date limite de passage d'un pulvérisateur à grand travail. Elle peut correspondre aussi à celle d'un traitement contre la Noctuelle gamma qu'il est possible d'effectuer en même temps.

Des essais effectués par MAURICE à Quimper (travaux non publiés) ont montré que le bore du borate de soude est facilement entraîné vers les couches profondes du sol sous l'influence des eaux de drainage mais, jusqu'à plus ample information, la fréquence des apports boratés peut rester celle de chaque culture de betteraves.

Le rutabaga et le navet sont encore plus sensibles que la betterave, mais extériorisent, eux, des taches brunes à l'intérieur de la racine (maladie du cœur brun) ; ces taches disparaissent facilement sous l'action des enfouissements de borate.

## CULTURES MARAICHÈRES DE PLEIN CHAMP (CARENCES EN CUIVRE ET MANGANÈSE)

La carence en cuivre a occasionné, au cours des dernières années, des dégâts importants en culture de petits pois destinés à la conserve : gousses soufflées avec absence de grain à l'intérieur. Aujourd'hui, l'importance de ces dégâts régresse

puisque les parcelles des bons agriculteurs ont reçu le sulfate de cuivre nécessaire.

La carence en manganèse peut provoquer des chloroses internervaires sur pois et haricots verts croissant sur les sols surchaulés sans que cela présente une importance agronomique.

La zone légumière du nord de la Bretagne est établie sur des limons éoliens mais elle déborde largement, de nos jours, sur d'autres types de terrain. Ces limons sont, sans doute, originellement déficients en cuivre puisque quelques cas d'effets positifs du sulfate de cuivre y ont été observés sur artichauts. Il s'agit, naturellement, de parcelles n'ayant pas reçu de traitements anticryptogamiques à base de sels de cuivre.

Sur artichauts également, des chloroses, guéries par la pulvérisation foliaire d'une solution de sulfate de manganèse, sont signalées dans les zones des parcelles trop fortement chaulées, mais sur d'autres sols que les limons car ces derniers sont toujours bien pourvus en « Mn actif ».

Sur les choux-fleurs cultivés dans ces mêmes régions, nous n'avons pas, jusqu'à ce jour, d'indications permettant de mettre en cause la carence molybdique.

## LE COBALT ET LE CUIVRE DANS LES PLANTES FOURRAGÈRES

Dans le cadre de la connaissance de la valeur minérale des fourrages finistériens, qui a permis à la Maison de l'Élevage de proposer des formules de compléments minéraux bien adaptées, nous possédons déjà un certain nombre de résultats concernant les micro-éléments : Mn, Cu, Co dans les foins, herbes, choux fourragers, betteraves et maïs (COPPENET et CALVEZ, 1967). Nous nous préoccupons, surtout, de bien connaître les variations de composition minérale du ray-grass italien et du maïs puisque ces deux plantes constituent une très forte proportion des UF produites dans les exploitations les plus évoluées. La Station de Quimper publiera, dans quelques temps, un mémoire sur le cobalt dans le ray-grass italien et les causes de ses variations de teneur : stades physiologiques, époques de l'année, nature du sol, fertilisation NPK, enfouissements ou pulvérisations de sels de cobalt.

Nous donnerons donc seulement, ici, un aperçu des teneurs en cobalt des principaux sols armoricains avec leurs conséquences sur la teneur des ray-grass. Le tableau ci-après met en parallèle les richesses en cuivre et en cobalt des sols.

Le classement est le même pour les deux éléments, les richesses vont croissant des roches les plus silicatées aux roches constituées de minéraux lourds et ferromagnésiens en passant par le granite de Vire et les schistes primaires. Le granite de Vire contient une bonne proportion de mica noir ainsi que divers minéraux lourds. Ces constatations rejoignent et confirment les prévisions des géochimistes sur la distribution des éléments-traces dans les roches. On lira, à ce propos, l'étude de PÉDRO dans ce même numéro des *Annales agronomiques*.

Nous avons, bien entendu, effectué le plus grand nombre d'analyses sur les deux types de roches les plus répandus et les plus typiques de la Bretagne : granites et schistes. En vue d'établir la liaison sol-plante de la manière la plus étroite possible, nous avons effectué l'analyse d'échantillons provenant d'un seul point (cercle de

0,50 m de diamètre) d'une parcelle de ray-grass pur. Ces parcelles, prises au hasard, sont situées au sud-ouest de Quimper pour les granulites et dans la région Châteaulin-Pleyben pour les schistes carbonifères.

| | Cuivre total | | Cobalt des sols | |
|---|---|---|---|---|
| | Roches (p.p.m.) | Sols (p.p.m.) | Soluble acides forts (p.p.m.) | Soluble acide acétique 2,5 % (p.p.m.) |
| Grès armoricains ..... | 1,5 | 5,0 | | 0,2 à 0,4 |
| Granites et granulites (Fin., C.-du-N., Mhan) ..... | 4,8 | 4,05 | *2,15* (1,0 à 4,5) * | *0,28* (0,10 à 0,53) |
| Granite de Vire (départements 35, 50, 62, 53) .. | 19,9 | 15,7 | | 0,6 à 0,9 |
| Gneiss et micaschistes .... | 17,8 | — | | — |
| Schistes primaires ..... | 22,7 | 26,8 | *9,8* (6,4 à 13,3) | *0,56* (0,25 à 0,98) |
| Limons éoliens ..... | — | | | 0,4 à 0,7 |
| Amphibolites ..... | 88,5 | | | 1,7 |
| Serpentines ..... | — | | | 7,0 |

* Nous ne possédons pas, à ce jour, beaucoup d'analyses de cobalt soluble aux acides forts, mais nous empruntons ces valeurs à la note analytique de Moré (1969).

| | Cuivre (p.p.m.) | | | | Cobalt (p.p.m.) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Granites | | Schistes | | Granites | | Schistes | |
| | sol | plante | sol | plante | sol | plante | sol | plante |
| R. G. I. épiaison 1967-1968 23 granites 20 schistes | 11,7 | 3,0 | 24 | 3,3 | 0,26 | 0,032 | 0,76 | 0,068 |
| R. G. I. stade pâturage 1969 10 granites 12 schistes | 8,7 | 4,26 | 20,7 | 5,4 | 0,20 | 0,045 | 0,87 | 0,11 |
| R. G. I. stade épiaison 1969 11 granites 11 schistes | 10,4 | 3,0 | 21,6 | 3,06 | 0,25 | 0,030 | 0,89 | 0,055 |

Ce tableau montre la liaison entre la teneur des sols et la teneur des ray-grass, les différences étant beaucoup plus grandes dans le cas du cobalt que dans le cas du cuivre. Notons que les parcelles granitiques ont reçu du cuivre et sont guéries de leur carence originelle.

Voici les calculs de régression correspondants :

si $y$ = teneur en Cu de la M. S. du ray-grass (62 échantillons au stade épiaison),
$x$ = teneur en Cu total de la terre fine,

$y = 0{,}0165x + 2{,}85$ (significatif pour $P = 0{,}05$)
coefficient de corrélation $r = 0{,}29$ (significatif) ;

si Y = teneur en Co de la M. S. du ray-grass (43 échantillons au stade épiaison),
X = teneur en Co acétique de la terre fine,

$Y = 0{,}18X - 0{,}0439$ (hautement significatif pour $P = 0{,}01$)
coefficient de corrélation $r = 0{,}60$ (hautement significatif).

Nous attirons l'attention sur le fait que les ray-grass purs ont des teneurs souvent inférieures au seuil admis pour les ruminants (0,07 p.p.m.), et ceci surtout en régions granitiques. C'est d'ailleurs dans ces régions que les services de la Maison de l'Élevage du Finistère ont observé des accidents sur bovins imputables à des carences minérales.

Il y a vingt ans, la Bretagne a eu à résoudre des problèmes sérieux d'oligo-éléments avec les carences en manganèse et en cuivre des céréales mais, de nos jours ces problèmes sont résolus, tout au moins en ce qui concerne le conseil à donner aux agriculteurs. L'analyse chimique des sols permet de prévoir, avec un bon degré de certitude, l'éventualité d'une déficience des cultures à venir dans une parcelle donnée. En cours de végétation, un technicien ou un agriculteur exercé peut reconnaître les symptômes de ces carences et intervenir par pulvérisation foliaire. Les chaulages devront toujours être faits avec modération et les doses calculées après une analyse chimique des sols. Enfin, si la carence cuprique n'est possible que sur granites et grès quartzeux, il ne faut pas oublier cette éventualité au moment de la mise en culture de nouvelles terres.

En production maïsicole, c'est l'oligo-élément zinc qui doit préoccuper et si l'analyse du sol n'est pas encore au point pour cet élément, il est, par contre, possible de déceler une carence *in situ* et de conseiller un remède. L'éleveur aura ensuite à se préoccuper de la teneur en zinc de ce maïs en vue de sa consommation par le bétail.

Les betteraves et rutabagas seront le révélateur des possibilités d'alimentation borique des sols, car ces plantes sont particulièrement sensibles à la carence en bore, mais leur guérison est facile.

Enfin, en région granitique, il est certain que les fourrages sont moins riches en cuivre et en cobalt, d'où il sera nécessaire de surveiller plus attentivement ces zones et d'étudier judicieusement les compléments minéraux destinés au bétail.

*Reçu pour publication en juin 1970.*

## SUMMARY

EXAMPLES OF REGIONAL DEFICIENCY.

I. — THE ARMORICAN MASSIF

The Armorican Massif, with its marked Atlantic climate, consists of granitic rocks and of primary schists lacking in limestone. The soils are very rich in organic material, shallow, with a low clay content but very sandy, especially over granite. Granites in which white mica predo-

minates, and high-quartz sandstones, are very poor in copper ; while the practice of applying lime, which is essential to success in growing many crops, fosters deficiencies in manganese, boron and zinc.

The effect of these various trace elements deficiencies on agricultural production in these regions is reviewed :

production of grain, wheat, barley, oats (manganese and copper deficiencies),
production of maize (zinc deficiency),
forage grasses (copper deficiency),
forage pulse crops (copper deficiency),
beet, swedes and turnips (boron deficiency),
open-field market gardening (copper and manganese deficiencies).

Finally, relations are given between the copper and cobalt contents of the soils and the copper and cobalt contents of ray-grass dry matter grown on these soils.

## ZUSAMMENFASSUNG

### BEISPIELE VON REGIONALPROBLEMEN

### I. — DER ARMORIKANISCHE GEBIRGSSTOCK

Der mit ausgesprochen atlantischem Klima umgebene armorikanische Gebirgsstock besteht aus granitischen Gesteinen und aus primären Schiefern frei von Kalkstein. Die Böden sind sehr reich an organischem Material, von geringer Tiefe, tonarm und sehr sandig, besonders auf den granitischen Felsen. Die Granite mit dominierendem, weissem Glimmer, sowie die quarzhaltigen Sandsteine sind sehr arm an Kupfer, während das Kalken, das unbedingt notwendig ist, um zahlreiche Kulturen durchzuführen, den Mangel an Mangan, an Bor und an Zink begünstigt.

Der Einfluss dieser Mängel an verschiedenen Spurenelementen auf die landwirtschaftlichen Erträge in diesen Gebieten wird untersucht :

Getreideerzeugung : Weizen, Gerste, Hafer (Mangel an Mangan und an Kupfer) ;
Maiserzeugung (Mangel an Zink) ;
Futtergräser (Mangel an Kupfer) ;
Futterhülsenfrüchte (Mangel an Kupfer) ;
Rüben, Kohlrüben und weisse Rüben (Mangel an Bor) ;
Gemüsebau auf offenem Feld (Mangel an Kupfer und Mangan).

Anschliessend werden die Beziehungen zwischen dem Bodengehalt an Kupfer und Kobalt und dem Gehalt an Kupfer und Kobalt der Trockensubstanz des auf diesen Böden gewachsenen Raygrases aufgezeigt.

## РЕЗЮМЕ

*Примеры областных задач.* I. *Арморикапский массив.*

М. КОППЕНЭ.

Арморикапский Массив, с его ярко выраженным атлантическим климатом, образован из гранитических пород и первичных сланцев, плохо обеспеченных известью. Они богаты органическим веществом, неглубоки, слабо-глинисты или сильно-песчанны, особенно те из них, которые залегают на гранитах. Граниты, среди которых преобладают бело-слюдяные, и кварцевые песчанники, бедны медью, и в то-же время применение известкований, необходимых для успешного произрастания многих растений на этих почвах, вызывает недостаточности марганца, бора и цинка.

Автор разбирает последствия всех этих недостаточностей в микроелементах для сельскохозяйственной продукции этого района.

Зерновые культуры : пшеница, ячмень и овес — недостаточность марганца и меди. Кукуруза — недостаточность цинка. Кормовые злаковые — медная недостаточность. Кормовые зерно-бобовые — недостаточность меди. Свекла, кормовая свекла, брюква — недостаточность бора. Полевые овощные культуры — марганцевая и медная недостаточность.

И, наконец, указываются соотношения между содержанием меди и кобальта в почвах и содержанием этих-же элементов в абсолютно сухой массе рай-грасса возделывавшегося на этих почвах.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BOUVATTIER C., 1960. Contribution à l'étude agronomique de la région d'Ancenis. *Ann. agron.*, **11**, 577-600.

COÏC Y., COPPENET M., 1949. Détection de carences en manganèse dans les terres humifères de Bretagne. *C. R. Acad. Sc.*, p. 1 379.

COÏC Y., COPPENET M., 1952. Différence de sensibilité à la carence en manganèse de variétés d'avoine. *C. R. Acad. Agr.*, p. 209.

COÏC Y., COPPENET M., 1958. Sur la carence en manganèse des céréales dans les sols humifères de Bretagne. *Ann. Physiol. vég.*, suppl. II, 111-138.

COPPENET M., CALVEZ J., 1955. Sur l'origine des carences en cuivre dans les sols de Bretagne. *C. R. Acad. Sc.*, p. 1 068, et *VI^e Congr. Internation. Science du Sol*, Paris, 1956, vol. II, 13, 493-497.

COPPENET M., DUVAL L., 1964. Détection de carences en zinc sur maïs dans le Finistère. *C. R. Acad. Agr.*, 449-456.

COPPENET M., 1965. Observations sur les carences en bore existant en Bretagne. *C. R. Acad. Agr.*, 140-149.

COPPENET M., CALVEZ J., 1967. Les oligo-éléments et, en particulier, le cobalt dans les sols et les fourrages du Finistère. *C. R. Acad. Agr.*, 939-947.

COPPENET M., RAMPON L., 1967. Contribution à l'étude des sols granitiques et schisteux de Bretagne. Le bassin versant du Blavet. *Ann. agron.*, **18**, 455-484.

COPPENET M., 1969 *a*. Résultats de douze années d'observations lysimétriques à Quimper (1954-1965). *Ann. agron.*, **20**, 111-143.

COPPENET M., 1969 *b*. Les sols de Galice comparés aux sols de Bretagne occidentale. *Science du Sol*, (2), 43-56.

CORILLION, 1962. *Notice détaillée de la feuille 23-Alençon de la carte de la végétation de la France au 200 000^e*, C. N. R. S. Toulouse. — *Travaux du laboratoire de biologie végétale de la Faculté libre des Sciences d'Angers*. Notes et mémoires Fasc., **18**, 49-132.

DUVAL L., 1962. Sur les caractères pédologiques et agronomiques des sols gréseux du nord de la Mayenne. *Bulletin de Mayenne-Sciences*, 66-82.

DUVAL L., 1963. Existence de graves carences en cuivre dans les sols gréseux de la Basse-Normandie et du Bas-Maine. *C. R. Acad. Agr.*, 1216-1220.

GAUTIER M., 1963. Recherches agronomiques récentes dans le domaine des carences des sols et leur intérêt géographique. *Congrès de l'A. F. A. S.*, Rennes, 1963 ; et Penn ar Bed, *Rev. région. Géographie, Sciences naturelles, Protection de la nature* (34), 81-88.

MORÉ E., 1969. Sur le microdosage colorimétrique du cobalt dans les végétaux : interférence du fer, contaminations par la terre. *Ann. agron.*, **20**, 527-538.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (5), 603-615.

# EXEMPLES DE PROBLÈMES RÉGIONAUX

## II. — Le sud-ouest

J. DELAS et A. DARTIGUES

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches de Bordeaux, 33 - Pont-de-la-Maye*
*Institut national de la Recherche agronomique*

RÉSUMÉ

Les oligo-éléments posent de nombreux problèmes dans le Sud-Ouest atlantique ; l'importance de ces problèmes et les méthodes utilisées pour les résoudre sont illustrées au moyen de trois exemples :

— toxicité du cuivre apporté par les traitements anticryptogamiques dans les sols du vignoble bordelais ;

— toxicité de l'aluminium provenant de l'altération des silicates dans les sols de landes et de touyas ;

— carence en zinc du maïs.

Si la variété des sols du Sud-Ouest atlantique joue un grand rôle dans le nombre et la diversité des problèmes posés par les oligo-éléments, d'autres caractères de cette vaste région contribuent à donner à ces problèmes une importance particulière, par exemple : le climat doux et humide, qui provoque l'appauvrissement des sols les plus légers, ou bien la monoculture (maïs, vigne, arbres fruitiers, pin maritime), qui modifie profondément la dynamique de certains éléments.

La plupart des carences en oligo-éléments ont été signalées dans notre région : cuivre (sols sableux des Landes), zinc (sols surchaulés du Bassin de l'Adour), fer (sols calcaires), bore (vignobles du Gers et du Lot-et-Garonne), molybdène (luzerne) ; de plus, les phytotoxicités de l'aluminium et du cuivre ont une importance toute particulière dans le Sud-Ouest.

Dans ces conditions, plutôt que de consacrer de très longs développements à traiter les problèmes d'oligo-éléments dans le Sud-Ouest de manière exhaustive, il nous a paru préférable de limiter notre propos à trois problèmes qui, en raison de leur importance économique, ont été étudiés plus en détail : la toxicité du cuivre, la toxicité de l'aluminium, et la carence en zinc du maïs.

## I. — TOXICITÉ DU CUIVRE

Des recherches sur la toxicité du cuivre ont été entreprises il y a une dizaine d'années à la suite de la multiplication, dans les sols du vignoble bordelais, d'accidents de végétation d'un type particulier (DELAS *et al.*, 1959, 1960 ; DELAS, 1963 et 1967).

Les troubles se manifestent après arrachage d'une vieille vigne, lors de la remise en culture (semis de plantes annuelles ou replantation) ; ils consistent essentiellement en une levée irrégulière, voire nulle, une croissance très ralentie, une mortalité élevée dans le cas de jeunes plants de vigne ; les symptômes extérieurs ne sont pas spécifiques ; seule l'atrophie extrême du système radiculaire est observée dans tous les cas.

L'enquête réalisée en 1958-1959 dans le vignoble bordelais a révélé que les seules caractéristiques communes à tous les sols où ces accidents survenaient étaient leur teneur très élevée en cuivre échangeable (jusqu'à 200 mg/kg de terre) et leur pH acide ; des essais en pots et en plein champ ont confirmé la phytotoxicité de ces fortes doses de cuivre en sol acide, déjà signalée par de nombreux auteurs.

Les caractéristiques du climat atlantique et l'évolution des sols qui en découle contribuent à donner au problème de la toxicité du cuivre dans notre région une particulière gravité ; d'importantes pluies de printemps rendent indispensables de nombreux traitements anticryptogamiques d'un vignoble constitué de plants français sensibles aux attaques du mildiou ; les produits les plus utilisés pour ces traitements ont été, de 1885 à nos jours, les sels de cuivre, du type bouillie bordelaise ; on a calculé que l'apport maximum de métal au sol pouvait atteindre, après 80 ans, 1,5 gramme de cuivre par kg de terre dans le cas de culture continue de la vigne.

Le climat atlantique contribue d'une autre manière à accroître la phytotoxicité du cuivre : le lessivage des sols légers — cas de beaucoup de sols viticoles — a pour conséquence une acidification importante, qui est encore accentuée par les apports de soufre, souvent répétés, destinés à combattre l'oïdium (POCHON *et al.*, 1962 ; POCHON et CHALVIGNAC, 1965) ; or l'acidité du sol est un facteur déterminant de l'apparition de la toxicité du cuivre.

### *Caractéristiques de la toxicité du cuivre*

Les doses à partir desquelles le cuivre se révèle toxique dépendent du végétal et du type de sol. Nous avons déjà rappelé le rôle du pH ; la capacité d'échange intervient et, à dose égale de cuivre, la toxicité est d'autant plus grande que la C. E. C. est plus faible ; en sols sableux très acides, des accidents sur plantes annuelles peuvent apparaître dès 20 à 25 mg de cuivre échangeable par kg de terre.

Dans les sols viticoles, très pauvres en matière organique, le cuivre migre peu en profondeur mais se concentre dans la couche travaillée ; la résistance de la vigne en place n'est pas uniquement due à sa moindre sensibilité mais provient également de la présence de son système radiculaire au-dessous de la zone d'accumulation ; au moment des replantations, les boutures de vigne mises en sol riche en cuivre sont en grande partie détruites.

Si la migration du cuivre est faible dans les sols de vigne, il n'en est pas de même dans les podzols humo-ferrugineux (très riches en matière organique), où le cuivre peut être entraîné en profondeur sous forme de complexe, avec les composés humiques les plus mobiles (DELAS, 1967).

Par une méthode de dilution isotopique, on a pu démontrer qu'une partie importante du cuivre accumulé depuis 80 ans dans les sols viticoles demeurait sous forme diffusible ; il est donc à craindre, au cas où les apports se poursuivraient, que la toxicité du métal ne se manifeste également dans des sols où elle est pour le moment inconnue. Il y a une dizaine d'années, l'apparition de produits anticryptogamiques organo-métalliques n'apportant plus ou que peu de cuivre provoquait une régression importante de l'utilisation des bouillies cupriques traditionnelles ; on pouvait alors penser que les apports de cuivre au sol allaient bientôt cesser ; en fait, on assiste depuis peu à un certain regain de faveur des préparations à base de sels de cuivre ; ce retour, même partiel, aux bouillies cupriques oblige à considérer le problème de l'accumulation du cuivre comme toujours d'actualité.

### *Traitement de la toxicité*

Les effets de la toxicité du cuivre en sol acide peuvent être fortement atténués par le chaulage jusqu'aux environs de pH-eau = 6 ; nous illustrerons l'efficacité de ce traitement, expérimenté en serre et en plein champ, au moyen des résultats d'un essai en pots concernant la sensibilité au cuivre de boutures de vigne non racinées, cultivées dans un sol sableux, avec ou sans chaulage ; les traitements et les résultats sont indiqués au tableau I.

TABLEAU I

*Influence des apports de cuivre et de chaux sur l'accroissement en poids de boutures de vigne cultivées en pots*

(Moyenne, en g, de 10 répétitions)
(d'après J. DELAS, non publié)

| | Sol non chaulé (pH-eau = 4,8) | | | Sol chaulé (pH-eau = 6,1) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Poids initial (février) | Poids final (août) | Accroissement de poids (%) | Poids initial (février) | Poids final (août) | Accroissement de poids (%) |
| Témoin sans Cu | 4,31 | 8,12 | 88,3 | 4,64 | 9,01 | 94,1 |
| 240 mg/kg de Cu total | 4,57 | 5,31 | 16,1 | 5,13 | 9,40 | 83,2 |

Dans le sol non chaulé (pH-eau = 4,8), l'apport de 240 mg de cuivre par kg de terre (taux de cuivre échangeable correspondant : 35 mg/kg) a très fortement inhibé l'accroissement en poids des boutures ; en sol chaulé, par contre, la même dose de cuivre n'a eu qu'une influence réduite sur la croissance des boutures.

Dans les conditions de la pratique agricole, le chaulage doit précéder la plantation ou le semis ; en cours de végétation, la rapidité d'action de l'amendement risque

d'être plus faible. Il faudra éviter, lors du défoncement précédant la plantation d'une vigne, d'enfouir en profondeur, sans chaulage préalable, la couche superficielle enrichie en cuivre : la phytotoxicité, dont l'apparition serait seulement retardée par cette pratique, ne disparaîtrait que lentement en raison des difficultés de modification du pH des horizons inférieurs.

Il est également recommandé, pour réduire les risques de toxicité du cuivre, de relever le niveau humique des sols (fumier, engrais verts, marcs de raisin, etc.) ; l'apport de matières organiques aura pour effet de diminuer l'activité du cuivre et de le rendre plus mobile (formation de complexes organo-métalliques).

Bien que l'efficacité des traitements précédents se révèle dans l'ensemble très satisfaisante, il faut noter cependant quelques rares échecs dans des sols extrêmement riches en cuivre et dont le pH est voisin de la neutralité ; ces exceptions sont la preuve de la grande toxicité du cuivre, qui est probablement le plus nocif des métaux qui peuvent s'accumuler dans les sols.

### *Conclusion*

La toxicité du cuivre est un phénomène à redouter dans certains sols viticoles acides du Bordelais ; elle doit être considérée comme un facteur de dégradation des sols de vignoble, au même titre que l'appauvrissement constant en matière organique, l'acidification, ou le très faible niveau en certains éléments minéraux. Les études poursuivies sur ce sujet ont permis de mieux connaître le phénomène et de mettre au point des méthodes de traitement.

## II. — TOXICITÉ DE L'ALUMINIUM

La présence, dans beaucoup de sols acides du Sud-Ouest atlantique, de quantités élevées d'aluminium échangeable a posé d'importants problèmes ; les recherches poursuivies sur ce sujet à la Station d'Agronomie du Centre de Recherches de Bordeaux ont eu pour objet de préciser la dynamique de l'aluminium dans les sols acides, les conditions d'apparition de la phytotoxicité de cet élément et les moyens propres à la corriger (Juste et Hamadi, 1963 ; Dutil et Juste, 1964 ; Juste, 1964 et 1965 ; Juste *et al.*, 1968).

Contrairement à ce qui se passe dans le cas du cuivre, l'aluminium en excès ne provient pas d'apports répétés par l'homme. Les minéraux argileux, dont l'aluminium est un constituant essentiel, sont soumis dans les conditions du climat doux et humide du Sud-Ouest atlantique à des phénomènes d'altération intense, dont la conséquence est la libération de quantités importantes d'aluminium échangeable ($Al^{+++}$) à la suite de l'abaissement du pH des sols. Ces phénomènes ont pris une ampleur particulière dans les podzols humiques des Landes de Gascogne (lande humide essentiellement) ainsi que dans les sols de touyas des Pyrénées-Atlantiques (sols bruns acides).

Pendant longtemps, l'accumulation d'aluminium est passée inaperçue : en effet, la lande humide portait du pin maritime qui semble bien adapté aux sols riches en aluminium et les touyas n'étaient pas cultivés (le rôle important du pin

et de la végétation spontanée dans le cycle de l'aluminium a été souligné par JUSTE, 1965). Les premières manifestations dues à la présence d'aluminium en excès se produisirent à la suite des tentatives de mise en culture des Landes après les grands incendies de forêts des années 1945-1947 et à la suite des défrichements des touyas ; les échecs répétés lors de ces tentatives de mise en valeur, allant souvent jusqu'à l'anéantissement de la récolte malgré des apports massifs d'éléments fertilisants, ont pu être attribués à la présence, dans ces sols très acides, de quantités importantes d'aluminium échangeable (souvent plus de 200 mg de $Al^{+++}$ par kg de terre) ; les recherches montrèrent également que ni la faible teneur des sols en calcium, ni leur pH acide en lui-même, ne jouaient aucun rôle direct dans ces accidents.

L'excès d'aluminium se manifeste sur des surfaces considérables, qu'on évalue à plus de 200 000 ha pour les Pyrénées-Atlantiques et les Landes, dans des zones dont le maïs et les herbages (en montagne) sont les vocations culturales.

*Traitement de la toxicité en aluminium*

Mais si les accidents provoqués par la phytoxicité de l'aluminium sont graves et spectaculaires, il est assez facile de les prévenir ; le seuil de précipitation de l'hydroxyde d'aluminium se situant à pH 4,8, l'élévation, par le chaulage, du pH du sol au-dessus de cette valeur diminuera considérablement l'activité de $Al^{+++}$. Des essais en pots, puis des essais en plein champ ont prouvé la remarquable efficacité de l'apport d'amendements calcaires, qui devra précéder toute fertilisation minérale. Nous donnerons pour preuve de cette efficacité les résultats d'un essai de longue durée, établi par JUSTE en collaboration avec l'Association générale des Producteurs de Maïs (A. G. P. M.) ; le but de cet essai est de définir la dose et le mode d'apport d'un amendement calcaire susceptibles de conduire au rendement maximum du maïs cultivé sur un sol de défriche riche en aluminium. L'essai a été établi dans les conditions mêmes de la pratique agricole en 1963, l'année qui a suivi le défrichement d'une lande à touyas ; il est implanté en sol argilo-limoneux, très acide (pH-KCl N = 4,0), très riche en matière organique (8,6 p. 100) et en aluminium échangeable (356 mg/kg). Les modalités d'apport de l'amendement (carbonate de calcium) sont indiquées au tableau 2 ; l'ensemble du dispositif a reçu chaque année, avant le semis du maïs, 140 unités/ha d'azote, 180 unités/ha d'acide phosphorique, 150 unités/ha de potasse.

Les parcelles n'ayant jamais reçu de calcaire (traitement I) ont chaque année un rendement extrêmement faible ; par contre, le chaulage provoque des accroissements de rendement considérables. Pendant les premières années, c'est l'apport de 4 000 kg/ha en CaO en une seule fois (traitement V) qui conduit à la production maximum, mais en 1968 l'efficacité du fractionnement semble s'affirmer, en raison, sans doute, de l'atténuation des effets du chaulage dans le traitement V « apport unique ».

Les analyses de sols effectuées en février 1969 révèlent que les teneurs en azote, acide phosphorique, potassium et matières organiques sont pratiquement les mêmes dans les cinq traitements ; les pH sont très légèrement modifiés (les sols de touyas ont un fort pouvoir tampon) : l'apport de 4 t/ha en CaO (en une ou plusieurs fois) n'a élevé le pH que de 7/10 d'unité ; les variations du taux d'aluminium échangeable sont plus nettes : la teneur passe de près de 400 mg/kg dans le témoin non chaulé (traitement I) à 188 dans le traitement II et à 155 environ dans les traitements III, IV et V ; si le chaulage n'a pas abaissé le taux d'aluminium échangeable au-dessous

TABLEAU 2

*Influence de la dose et du mode d'apport de la chaux sur le rendement du maïs cultivé sur un sol de défriche acide des Basses-Pyrénées*
*Moyennes de 5 répétitions* (d'après C. JUSTE, P. SOLDA, A. LABORDE, M. DARRIGRAND, 1968)

| | Traitements | | | | | | | | | | P.p.d.s. | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | I | | II | | III | | IV | | V | | | |
| | CaO (kg/ha) | Rdt (q/ha) | CaO (kg/ha) | Rdt (q/ha) | CaO (kg/ha) | Rdt (q/ha) | CaO (kg/ha) | Rdt (q/ha) | CaO (kg/ha) | Rdt (q/ha) | 0,05 | 0,01 |
| Année : 1963 | 0 | | 500 | | 1 000 | | 2 000 | | 4 000 | | | |
| — 1964 | 0 | 16,7 | 500 | 20,3 | 500 | 27,2 | 500 | 28,4 | 0 | 30,7 | 9,0 | N. S. |
| — 1965 | 0 | 5,1 | 600 | 35,4 | 1 000 | 55,1 | 1 500 | 66,0 | 0 | 70,9 | 10,9 | 15,3 |
| — 1966 | 0 | 2,6 | 600 | 52,9 | 500 | 53,1 | 0 | 65,0 | 0 | 67,0 | 12,4 | 17,1 |
| — 1967 | 0 | 14,3 | 600 | 55,2 | 1 000 | 55,1 | 0 | 56,7 | 0 | 55,8 | 10,6 | 14,9 |
| — 1968 | 0 | 7,5 | 1 200 | 70,7 | 0 | 68,1 | 0 | 70,5 | 0 | 65,1 | 4,7 | 6,6 |
| Quantité totale de CaO apportée en 6 ans | 0 | — | 4 000 | — | 4 000 | — | 4 000 | — | 4 000 | — | — | — |
| Rendement annuel moyen (en q/ha). | — | 9,2 | — | 46,9 | — | 51,7 | — | 57,3 | — | 57,9 | — | — |
| % d'augmentation de récolte par rapport au témoin non chaulé .. | — | 0 | — | + 410 | — | + 462 | — | + 523 | — | + 529 | | |
| pH-eau (février 1969) | — | 4,2 | | 4,9 | | 4,9 | | 4,9 | | 4,9 | | |
| $Al^{+++}$ échangeable en mg/kg (février 1969) | | 395 | | 188 | | 159 | | 157 | | 155 | | |

du seuil de toxicité (environ 50 mg/kg), il n'en a pas moins réduit dans de fortes proportions la phytotoxicité de cet élément.

Cet essai est poursuivi, ainsi que plusieurs autres, afin, d'une part, de fixer la dose d'amendement en fonction du type de sol et, d'autre part, d'étudier la rémanence des apports ainsi que leurs conséquences sur les propriétés des sols.

*Conclusion*

La mise en culture depuis une dizaine d'années, dans le Sud-Ouest, de vastes surfaces (Landes, touyas) se justifie par les besoins toujours accrus de l'Europe en maïs. Mais cette mise en valeur, qui concerne essentiellement des sols acides, peut échouer en raison de la phytotoxicité de l'aluminium présent en quantités importantes dans ces sols.

Les recherches poursuivies à la Station d'Agronomie du C. R. B. ont permis de proposer et d'expérimenter une solution efficace à ce problème : il s'agit de l'apport d'amendement calcaire, dont l'emploi judicieux conditionne la réussite de la mise en culture de nombreux sols acides du Sud-Ouest atlantique ; mais ce chaulage ne devra être effectué qu'après détermination du pH et du taux d'aluminium échangeable.

## III. — CARENCE EN ZINC DU MAÏS

La carence en zinc sur maïs fut signalée pour la première fois dans notre région en 1961, près d'Orthez (ROUTCHENKO, 1961) ; depuis, elle n'a cessé de s'étendre, gagnant tout le bassin de l'Adour, le Gers et même certains sols calcaires des Charentes ; les surfaces où la carence est susceptible de se manifester s'élèvent à environ 500 000 ha dans les Pyrénées-Atlantiques et les Landes et 100 000 ha en Charente et Charente-Maritime.

Des recherches ont été entreprises en 1961 dans le but de définir les caractères propres à ce trouble de la nutrition, ainsi que les traitements les plus aptes à le prévenir ou à le guérir (DARTIGUES *et al.*, 1963 ; DARTIGUES, 1964 ; DARTIGUES et LUBET, 1967 et 1968).

Avant de résumer les résultats acquis, il est nécessaire de décrire les symptômes de la carence en zinc du maïs dont la connaissance est loin d'être familière aux praticiens : une décoloration du tiers inférieur du limbe, suivant deux plages situées de part et d'autre de la nervure centrale, apparaît peu après la levée ; ces taches s'étendent sous forme de deux bandes pâles plus ou moins translucides vers le tiers médian de la feuille ; la nervure principale et le bord du limbe restent verts ; les premières feuilles de la base ne sont pas atteintes ; les entre-nœuds sont souvent courts, le développement réduit, la maturité retardée, les rendements en grain très fortement diminués. Dans le Bassin de l'Adour, où apparurent les premiers accidents, la carence peut aller jusqu'à l'anéantissement complet de la récolte.

*Conditions d'apparition de la carence*

L'apparition de la carence est une conséquence de l'intensification de la culture provoquée par l'introduction des maïs hybrides ; les rendements ont été fortement augmentés ainsi que les apports d'engrais purs et d'amendements ; la monoculture

du maïs a modifié les techniques culturales : au total, les besoins en zinc du maïs, plante particulièrement exigeante, n'ont plus été assurés en raison de l'accroissement des exportations et du blocage du zinc dans le sol (sur-chaulage, excès d'engrais phosphatés).

Une enquête effectuée dans le Bassin de l'Adour et portant sur une centaine de situations différentes a révélé que la carence en zinc ne se manifestait que si deux conditions étaient simultanément réunies :

*a*) faible niveau des réserves en zinc (zinc total ou zinc extractible par HCl 0,2 N) : pour 90 p. 100 des sols étudiés, le niveau moyen du zinc total se situe autour de 25 mg de zinc par kg de terre, alors que les sols considérés comme normalement pourvus ont une teneur moyenne de 40 mg/kg (la teneur de 25 mg/kg de zinc total correspond à peu près à 2,1 mg/kg de zinc extractible par HCl 0,2 N).

*b*) existence d'un pH élevé : l'enquête a mis en évidence une relation étroite entre l'élévation du pH du sol et la manifestation des signes de carence en zinc sur maïs ; environ 80 p. 100 des plantes présentent des symptômes de carence pour un pH-eau du sol supérieur à 6,4 ; en dessous de ce pH, 91 p. 100 des plantes ont un développement apparemment normal. Les pH élevés de ces sols lessivés résultent de chaulages et marnages excessifs sans contrôle de l'évolution du sol.

On a cherché à recréer expérimentalement, dans un sol acide non carencé mais à faible réserve en zinc, ces conditions d'apparition de la carence (sol limono-sableux, pH-eau = 6,05, zinc extractible par HCl 0,2 N = 1,2 mg/kg). Les traitements consistent en un apport au sol de deux formes d'amendement (calcaire broyé et marnes) à des doses correspondant à la pratique agricole. Les traitements et les résultats acquis jusqu'ici sont indiqués au tableau 3.

TABLEAU 3

*Influence d'amendements calcaires sur la teneur en zinc du maïs*

(A. DARTIGUES, E. LUBET, résultats non publiés)

| Traitements | pH-eau après 3 années de culture<br>Moyenne de 4 répétitions | Concentration en zinc des feuilles à la 3e année de culture (mg/kg de M. S.)<br>Moyenne de 4 répétitions |
|---|---|---|
| Témoin ..... | 6,15 | 27,5 |
| Calcaire 1 ( 937 kg/ha en CaO) ... | 6,40 | 22,1 |
| Calcaire 2 (1 875 kg/ha en CaO) .. | 6,35 | — |
| Calcaire 3 (3 750 kg/ha en CaO) ... | 7,00 | 17,5 |
| Marne 1 ( 3 750 kg/ha en CaO) ... | 6,55 | 19,9 |
| Marne 2 ( 7 500 kg/ha en CaO) ... | 6,85 | 18,0 |
| Marne 3 (15 000 kg/ha en CaO) ... | 7,45 | 15,9 |

Il n'a pas été constaté de différences significatives de rendement pour les trois cultures de maïs effectuées après les apports d'amendements ; cependant, au cours de la troisième année, quelques symptômes caractéristiques de la carence en zinc sont apparus dans les traitements « calcaire 3 » et « marne 3 » ; une analyse foliaire

effectuée au stade de 12 feuilles a mis en évidence une diminution régulière de la concentration en zinc, en fonction de l'accroissement du pH : le maïs provenant des parcelles ayant reçu les plus fortes doses d'amendement est dans un état pré-carentiel ; dans les conditions de l'essai, la situation s'est améliorée spontanément et les symptômes se sont estompés. Plusieurs observations du même ordre prouvent que l'alimentation en zinc du maïs, mal assurée en début de végétation, peut, dans certains cas, s'améliorer au fur et à mesure du développement du système radiculaire : la nature du sous-sol et en particulier son pH conditionnent dans une certaine mesure la fourniture de zinc à la plante.

L'ensemble des observations précédentes a permis de mettre au point une méthode d'appréciation des risques de carence en zinc basée sur les déterminations simultanées du pH du sol et de la fraction de zinc extractible par l'acide chlorhydrique 0,2 N ; pour le maïs et dans les conditions de sol du Sud-Ouest atlantique, la carence est très hautement probable si dans la couche travaillée, le pH-eau est supérieur à 6,4 et le taux de zinc extractible par HCl 0,2 N inférieur à 3,3 mg/kg de terre.

Il est également possible de formuler un diagnostic de la carence en zinc du maïs grâce à l'analyse des feuilles ; le seuil critique se situe aux alentours de 12 à 15 mg de zinc par kg de matière sèche ; les dosages simultanés du fer et du phosphore dans les organes foliaires rendent le diagnostic plus aisé.

### *Traitement de la carence en zinc*

Plusieurs essais en plein champ ont permis de mettre au point les modalités pratiques du traitement de cette carence :

*Traitement par apport au sol.*

Seul le sulfate de zinc a été étudié ; si, dans de nombreux cas, un apport unique de 50 kg/ha de sulfate de zinc suffit à assurer les besoins du maïs pour deux ou trois ans, il arrive parfois que des doses voisines de 150 kg/ha ne permettent pas d'atteindre l'optimum de production. Mais les doses trop importantes ne peuvent être conseillées régulièrement, en raison des risques d'accumulation du zinc jusqu'à un niveau toxique (ces risques sont plus élevés dans le cas de la pomme de terre que dans celui du maïs). Pour la culture du maïs, les apports au sol doivent varier entre 70 et 100 kg/ha de sulfate de zinc, enfouis par le labour de printemps ; ils ne seront pas renouvelés avant trois ou quatre ans.

L'efficacité spectaculaire de ce traitement sera illustrée par les résultats d'un essai établi en plein champ, depuis 1962, à Aubagnan (Landes), en sol carencé en zinc (zinc extractible par HCl 0,2 N = 1,6 mg/kg ; pH-eau = 8,05 ; calcaire = traces). Les traitements appliqués et les rendements obtenus sont indiqués dans le tableau 4.

L'efficacité de l'apport unique de 25 kg/ha de sulfate de zinc en 1962 (traitements B et E) paraît se maintenir pendant 3 ans ; mais l'apport supplémentaire de 100 kg/ha dans le traitement E en 1965 conduit à une augmentation de rendement hautement significative par rapport au traitement B n'ayant reçu du zinc qu'au début de l'essai. Les rendements des parcelles témoins sans zinc (traitement D) s'abaissent progressivement pour devenir à peu près nuls en 1965 et 1966 ; mais l'apport de sulfate de zinc, en 1966, sur d'autres parcelles témoins sans zinc (traite-

TABLEAU 4

*Correction de la carence en zinc sur maïs*
*Essai d'Aubagnan — Moyennes de 4 répétitions*
(d'après DARTIGUES et LUBET, 1968)

| Années | Traitements | | | | | | | | P.p.d.s. | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | D | | F | | B | | E | | | |
| | Sulfate de zinc (kg/ha) | Rendement grain sec (q/ha) | Sulfate de zinc (kg/ha) | Rendement grain sec (q/ha) | Sulfate de zinc (kg/ha) | Rendement grain sec (q/ha) | Sulfate de zinc (kg/ha) | Rendement grain sec (q/ha) | 0,05 | 0,01 |
| 1962 | 0 | 30,8 | 0 | 30,0 | 25 | 54,8 | 25 | 62,7 | 9,0 | 12,5 |
| 1963 | 0 | 29,8 | 0 | 24,8 | 0 | 71,7 | 0 | 74,0 | 8,3 | 11,5 |
| 1964 | 0 | 21,6 | 0 | 24,4 | 0 | 88,7 | 0 | 91,1 | 14,3 | 19,8 |
| 1965 | 0 | 3,1 | 0 | 6,1 | 0 | 49,3 | 100 | 75,3 | 15,0 | 20,8 |
| 1966 | 0 | 4,1 | 200 | 82,2 | 200 | 80,4 | 0 | 83,2 | 5,8 | 8,1 |

ment F) dont la production était devenue très faible, conduit, l'année même de l'apport, à une production tout à fait comparable à celle des parcelles enrichies en zinc depuis plusieurs années.

*Traitement par pulvérisations foliaires.*

Ces apports, effectués en cours de végétation, ont un caractère curatif mais ils ne sauraient être parfaitement efficaces que s'ils sont très précoces et effectués dès la formulation du diagnostic de carence. De bons résultats ont été obtenus par l'emploi d'une solution aqueuse de sulfate de zinc à 1,5 p. 100 neutralisée avec 1 p. 100 de chaux agricole. Il est important d'effectuer au moins trois applications échelonnées tous les 7 à 10 jours, de façon à apporter par hectare l'équivalent de 5 kg de zinc-métal et à recouvrir le maximum de surface foliaire, le zinc appliqué sur la feuille n'ayant qu'une action locale.

## *Conclusion*

Les travaux poursuivis à la Station d'Agronomie du C. R. B. sur la carence en zinc du maïs ont débouché sur un ensemble de résultats du plus grand intérêt pour la pratique agricole locale.

Les symptômes sont maintenant parfaitement définis et le diagnostic de la carence par l'analyse du sol est au point. Le traitement de ce trouble de la nutrition du maïs, qui affecte des surfaces bien plus considérables qu'on ne l'imaginait au départ des recherches, donne toute satisfaction : l'apport au sol de 70 à 100 kg/ha de sulfate de zinc enfouis par le labour de printemps assure pour trois ans au moins une alimentation en zinc du maïs parfaite.

Ces travaux ont également été l'occasion de rappeler aux agriculteurs que si le chaulage est une pratique absolument indispensable dans les sols acides du Sud-Ouest atlantique, il ne doit pas être effectué sans discernement : les doses d'amendement seront fixées par l'analyse et on évitera que le pH-eau du sol soit relevé au-delà de 6,0.

*Reçu pour publication en juin 1970.*

## SUMMARY

EXAMPLES OF REGIONAL PROBLEMS

II. — THE SOUTH-WEST

Trace elements present certain problems in the Atlantic South-West ; the magnitude of these problems and the methods adopted to solve them are illustrated by means of three examples :

— copper toxicity introduced by fungicidal treatments in the wine-growing soils of the Bordeaux area,

— aluminium toxicity arising from weathering of silicates in soils of heaths and *touyas*,

— zinc deficiency of maize.

## ZUSAMMENFASSUNG

### BEISPIELE VON REGIONALPROBLEMEN
### II. — SÜDWEST-FRANKREICH

Im atlantischen Südwest stellen die Spurenelemente zahlreiche Probleme dar ; die Bedeutung dieser Probleme und die verwendeten Lösungsmethoden werden an Hand von drei Beispielen erläutert :

— Giftigkeit des durch die Fungizidbehandlungen in die Böden der Bordeaux-Weinberge gebrachten Kupfers,

— Giftigkeit des Aluminiums infolge der in den Heide- und Touyasböden hervogerufenen Veränderung der Silikate,

— Zinkmangel beim Mais.

## РЕЗЮМЕ

*Примеры областных задач.* II. *Юго-Запад.*

Ж. ДЕЛА, А. ДАРТИТ.

Много задач связанно с микроелементами на атлантическом Юго-Западе Франции; важность этих задач, и методы применяющиеся для их разрешения можно проиллюстрировать тремя примерами :

— токсичность меди внесенной в почвы бордосских виноградников фунгицидными препаратами.

— токсичность алюминия происходящего от выветривания силикатов в почвах пустошей и « туйя ».

— недостаточность цинка в культурах кукурузы.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


### TOXITÉ DU CUIVKE

DELAS J., DELMAS J., RIVES M., BAUDEL C., 1959. Toxicité du cuivre dans les sols viticoles du Sud-Ouest atlantique. *C. R. Acad. agric. Fr.*, **45**, 651-655.

DELAS J., DELMAS J., DEMIAS C., 1960. Étude par dilution isotopique du cuivre incorporé dans les sols depuis 70 ans. *C. R. Acad. Sci.*, **250**, 3867-3869.

DELAS J., 1963. La toxicité du cuivre accumulé dans les sols. *Agrochimica*, **7**, 258-288.

DELAS J., 1967. Liaisons entre cuivre et matière organique dans un podzol développé sur sable des Landes et accidentellement enrichi en cuivre. *Ann. agron.*, **18**, 17-29.

POCHON J., LEBORGNE L., TARDIEUX P., FALCOU-SIGRAND J., 1962. Influence des doses élevées de cuivre et de soufre sur la microflore bactérienne des sols viticoles (Médoc). *Ann. Inst. Pasteur*, Paris, **103**, 614-622.

POCHON J., CHALVIGNAC M. A., 1965. Oxydation biologique du soufre et dégradation des sols de vignoble. *Agrochimica*, **9**, 155-161.

### TOXICITÉ DE L'ALUMINIUM

DUTIL P., JUSTE C., 1964. Phytotoxicité de l'aluminium dans les sols des Landes en relation avec la présence d'alios à faible profondeur. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **50**, 434-441.

JUSTE C., HAMADI M., 1963. Acidité et aluminium échangeable dans quelques sols du Sud-Ouest atlantique. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **49**, 582-586.

JUSTE C., 1964. Influence du chaulage sur la phytotoxicité de l'aluminium mobile d'un sol de défriche riche en colloïdes minéraux. *Ann. agron.*, **15**, 5-22.

JUSTE C., 1965. *Contribution à l'étude de la dynamique de l'aluminium dans les sols acides du Sud-Ouest atlantique : application à leur mise en valeur.* Thèse, Nancy.

JUSTE C., SOLDA P., LABORDE A., DARRIGRAND M., 1968. Le chaulage et la mise en valeur des sols acides de défriche des Basses-Pyrénées. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **54**, 290-297.

## CARENCE EN ZINC DU MAÏS

DARTIGUES A., DELMAS J., LUBET E., ROUTCHENKO W., 1963. Premiers résultats sur l'étude de la carence en zinc dans le Sud-Ouest. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **49**, 266-279.

DARTIGUES A., 1964. Les déficiences en zinc chez les végétaux et leurs causes. Revue bibliographique. *Ann. agron.*, **15**, 667-691.

DARTIGUES A., LUBET E., 1967. Relation entre le pH du sol et la manifestation de la carence en zinc du maïs dans un secteur du Bassin de l'Adour ; possibilités et limites d'un diagnostic par l'analyse du sol. *Ann. agron.*, **18**, 285-299.

DARTIGUES A., LUBET E., 1968. Résultats d'expérimentations culturales sur la carence et la toxicité du zinc dans quelques sols du Sud-Ouest. *Bull. Ass. Fr. Ét. Sol*, **5**, 19-31.

ROUTCHENKO W., 1961. Détermination d'une carence en zinc sur maïs. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **47**, 739-741.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (5), 617-628.

# EXEMPLES DE PROBLÈMES RÉGIONAUX

## III. — Le sud-est

P. GOUNY et P. CORNILLON

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches d'Avignon, 84 - Montfavet*
*Institut national de la Recherche agronomique*

RÉSUMÉ

Un bref rappel des caractéristiques essentielles de la région Sud-Est de la France montre la diversité des conditions de milieu, notamment au point de vue structure géologique et évolution des sols. Cette diversité est la cause de la dispersion des observations relatives aux oligo-éléments.

L'importance des superficies occupées par les sols calcaires est soulignée. Dans ces formations, il y a souvent apparition de chlorose ferrique calcaire sur vigne et sur arbres fruitiers.

Dans les sols calcaires, on observe également des déficits en manganèse, surtout dans le cas d'accumulation de matière organique. La toxicité en manganèse est relativement fréquente dans les sols acides occupés par la vigne.

Les accidents provoqués par les déficits en zinc et en cuivre sont très rares. Par contre, dans les sols acides l'accumulation de cuivre due aux pulvérisations anticryptogamiques sur vigne peut provoquer des accidents par toxicité.

Le bore a été parfois rendu responsable de divers accidents sur végétation. Des études sur le comportement de cet élément dans les sols ont montré que les possibilités de déficit sont en fait peu fréquentes.

La carence en molybdène s'est traduite par des manifestations spectaculaires sur certaines cultures maraîchères installées sur de nouveaux périmètres irrigués en sols acides.

Il est malaisé de présenter une vue d'ensemble des problèmes posés par les oligo-éléments dans le Sud-Est de la France. Cela tient en premier lieu à la diversité des conditions de milieu : roches-mères, sols, climat, relief, mais également à la variété des cultures pratiquées et des techniques mises en jeu. Du fait de cette complexité, les observations faites ont le plus souvent un caractère fragmentaire ou ponctuel, et ne doivent être généralisées qu'avec la plus grande précaution.

Un rappel des caractéristiques essentielles de la région s'impose afin de situer le problème des oligo-éléments dans le cadre général du milieu naturel et agricole.

## I. — LA DIVERSITÉ DU MILIEU

Les ressources globales en oligo-éléments sont en relation avec la structure géologique de la région :

— roches cristallines dans les Cévennes, la bordure Est du Massif central, les Maures, l'Esterel et la Corse ;

— roches sédimentaires généralement calcaires des Pré-Alpes et des plissements provençaux ;

— formations alluviales anciennes ou actuelles.

L'évolution pédologique des roches-mères est sous la dépendance des facteurs physiques : relief et climat. Le relief montagneux, qui est la note dominante sur la plus grande partie du territoire, facilite l'action de l'érosion. Celle-ci empêche l'évolution des roches *in situ* et donne naissance à des lithosols sur les pentes et à des formations alluviales dans les vallées. Le climat, de type méditerranéen, chaud et aride dans les zones méridionales, devient plus frais et plus humide lorsque l'altitude s'élève. Son action pédogénétique peut être différente. Sur les terrasses alluviales anciennes, la pédogenèse est fonction des conditions climatiques qui ont régné aux époques antérieures.

L'évolution naturelle des sols peut se trouver en outre perturbée par les techniques culturales et une occupation humaine très ancienne : culture en terrasses, pratique récente ou ancienne de l'irrigation, utilisation de fortes quantités d'amendements organiques, défoncements et nivellements mettant à nu la couche géologique sous-jacente.

Ces divers facteurs agissent de façons différentes sur un matériau initial lui-même hétérogène et entraînent une fragmentation des conditions de milieu. C'est ainsi que la plupart des associations de sol définies pour l'établissement de la carte pédologique de la France se trouvent représentées dans le Sud-Est. Pour coordonner les observations relatives aux oligo-éléments, il est cependant nécessaire de rappeler les types pédologiques essentiels et leurs principales localisations géographiques :

— sols bruns acides et lithosols sur les contreforts des Pyrénées Orientales, la bordure des Cévennes, les Maures, l'Esterel et la Corse ;

— rendzines typiques, sols bruns calcaires et lithosols sur l'ensemble des collines calcaires du Languedoc et de la Provence ;

— sols bruns lessivés dans les Pré-Alpes du nord et leurs contreforts ;

— sols fersiallitiques sur les terrasses anciennes du Rhône, de ses affluents et de tous les fleuves côtiers ;

— alluvions modernes très généralement calcaires de ces mêmes cours d'eau.

La région Sud-Est se présente ainsi comme une mosaïque de situations originales qui nécessiteraient chacune un examen particulier. L'importance des superficies occupées par les sols calcaires mérite cependant d'être soulignée. Dans les sols calcaires, en effet, la pédogenèse assure une concentration des éléments présents dans les roches pré-existantes et les réserves en éléments secondaires sont le plus souvent assez élevées. Les présomptions de déficit sont au contraire plus grandes dans les sols acides ou lessivés.

Le pH du milieu intervient en outre pour modifier le pouvoir d'absorption des éléments par la plante. Aussi, malgré la grande diversité des conditions de milieu, nous serons amenés à opposer plus simplement les faits observés en sols calcaires à ceux observés en sols acides.

La nature des cultures pratiquées dans la région Sud-Est appelle enfin une remarque. Les plantes de grande culture occupent une place limitée dans l'économie régionale et elles sont souvent localisées dans des secteurs d'exploitation traditionnelle peu intensive. Leurs difficultés éventuelles de comportement n'ont généralement pas fait l'objet d'un examen approfondi et leur réaction vis-à-vis des oligo-éléments est encore mal connue. Les observations dont il sera fait état dans cet exposé se rapportent essentiellement aux cultures dominantes : viticulture, arbres fruitiers, cultures maraîchères et florales. Certains faits évoqués ici sous l'angle régional trouveront donc leur développement dans l'article consacré à la vigne et aux arbres fruitiers.

## II. — LES EFFETS SPÉCIFIQUES DES DIVERS OLIGO-ÉLÉMENTS

### 2. 1. – *Le Fer*

Le fer est très largement répandu dans les roches-mères et les sols de la région. Cependant, le problème de l'alimentation en fer des végétaux se trouve souvent posé lorsque le sol renferme un pourcentage important de calcaire. La nutrition minérale de certaines espèces végétales subit alors de graves perturbations, entraînant un manque de mobilité du fer à l'intérieur de la plante et l'apparition de manifestations chlorotiques sur le feuillage (Gouny et Mazoyer, 1953).

Les manifestations de la chlorose calcaire s'observent le plus souvent sur la vigne ou les cultures fruitières. Mais on les rencontre également sur d'autres cultures (*Asparagus*) et parfois même, sur la végétation spontanée. Elles sont aggravées lorsque les conditions de drainage du sol sont insuffisantes.

L'amélioration de l'alimentation en fer de la plante, par apport de sels de fer (sulfate, citrate, chélates) au sol ou en pulvérisation, permet de remédier de façon plus ou moins transitoire aux effets de la chlorose calcaire. Mais sur le plan économique, le choix judicieux des espèces ou porte-greffes résistant au calcaire permet seul d'apporter une solution valable au problème.

Pour le Sud-Est, compte tenu de l'importance de la vigne et des cultures fruitières d'une part et de l'étendue des superficies occupées par les sols calcaires d'autre part, la chlorose calcaire représente souvent un grave problème. Les manifestations les plus graves apparaissent dans les marnes plaisanciennes localisées en divers points de la vallée du Rhône et des fleuves côtiers ou sur certaines formations lacustres récentes (Pujaut, Le Thor, etc.) où le taux de carbonate de calcium peut dépasser 90 p. 100.

### 2. 2. – *Le Manganèse*

Les accidents provoqués par le manganèse dans l'agronomie régionale sont liés soit à son insuffisance, soit à son excès.

*Les insuffisances* se rencontrent dans les sols calcaires, où elles accompagnent généralement le déficit en fer, tandis que les excès sont au contraire caractéristiques des sols fortement acides.

En divers points du Roussillon, on a ainsi pu décrire des accidents chlorotiques sur vignes dus à une insuffisance en fer et en manganèse (VIDAL et MARCELIN, 1966) : une enquête sur l'ensemble du vignoble a montré que la carence se manifestait dans les sols calcaires peu profonds, de pH compris entre 7,1 et 7,7. Dans ces sols, les taux de Mn échangeable se situent entre 0,2 et 1,5 p.p.m. et le taux de Mn réductible entre 3,3 et 12,5 p.p.m. Au contraire, dans les sols neutres ou calcaires non déficients, de pH compris entre 6,5-7,4, le taux de Mn échangeable est de 1,9 à 13,6 p.p.m., celui de Mn réductible de 7,6 à 58 p.p.m.

Des observations similaires ont pu être faites également sur vignes, en plusieurs points du département du Gard, en sols très calcaires et mal drainés. Dans les plantes déficientes, la teneur en Mn des feuilles s'abaisse jusqu'à 10 p.p.m. (LEVY, 1964).

Cependant, les accidents provoqués par la carence en manganèse se manifestent principalement lorsque le pH élevé du sol s'accompagne d'une accumulation de matières organiques dans le profil. Un exemple de cette conjonction est réalisé dans les « Paluds », nom sous lequel on désigne d'anciennes zones marécageuses situées dans les dépressions de la vallée du Rhône et dont la mise en culture peut être relativement récente. Le tableau 1 donne la répartition du Manganèse dans un profil de sol des Paluds portant un verger de pommiers présentant des symptômes de déficience et où la teneur des feuilles en Mn descend à 7 p.p.m. (1).

TABLEAU I

*Répartition du Manganèse dans un sol de Palud*

| Profondeur | Teneur en calcaire (p. mille) | Matières organiques (p. mille) | Mn échangeable (p.p.m.) | Mn réductible (p.p.m.) |
|---|---|---|---|---|
| 0-10 cm | 67 | 320 | 0,6 | 86 |
| 10-20 cm | 167 | 461 | 1,0 | 29 |
| 20-40 cm | traces | 655 | 0,9 | 9 |
| 40-60 cm | traces | 693 | 7,0 | 22 |

*La toxicité* observée en sols acides est liée à la présence dans ces sols d'une fraction importante du manganèse à l'état réduit ($Mn^{++}$). Sa pénétration dans la plante est en outre facilitée par l'acidité du milieu. L'excès du manganèse absorbé provoque des accidents variés. De tels désordres s'observent principalement dans les sols fersiallitiques lessivés des anciennes terrasses fluviatiles. La culture de la vigne qui recouvre souvent ces formations aggrave encore les conditions initiales par suite des apports répétés de soufre qui ont accentué l'acidité naturelle du sol.

(1) Station d'Agronomie, C. R. A. d'Avignon-Montfavet. I. N. R. A. Travaux non publiés.

Les données analytiques concernant un sol fersiallitique de la Costière-du-Gard sont données dans le tableau 2 (RUTTEN, 1969). Lorsque les taux de manganèse atteignent des chiffres aussi élevés, les galets de surface sont recouverts d'un vernis violet, le niveau 35-50 cm renferme des concrétions manganiques et le sol est pratiquement stérile.

TABLEAU 2

*Répartition du Manganèse dans un sol fersiallitique de la Costière-du-Gard*

| Profondeur du prélèvement | pH (KCl) | Mn réductible (p.p.m.) |
|---|---|---|
| 0-20 cm | 3,8 | 255 |
| 20-35 cm | 4,6 | 317 |
| 35-50 cm | 4,9 | 559 |
| 50-60 cm | 5,9 | 268 |

Dans le Roussillon, des cas de toxicité sur vigne ont été observés dans des sols dont le pH est voisin de 4,5 avec une teneur en Mn réductible de 221 p.p.m. Les taux de Mn dans les feuilles de vigne dépassent 500 p.p.m. et peuvent atteindre 3 000 p.p.m. Le chaulage du sol, en modifiant les conditions de réduction du Mn dans le sol et ses possibilités d'absorption par la plante, permet une importante amélioration (VIDAL *et al.*, 1969).

En Costière-du-Gard, dans un sol dont le pH avait été partiellement corrigé (pH KCl = 6,5), on a relevé des taux de Mn atteignant encore 448 p.p.m. dans des feuilles de fraisier présentant une croissance anormale (RUTTEN, 1969).

Sur les terrasses du Rhône moyen, dans le département de la Drôme, on a relevé dans des feuilles de pêcher des taux de Mn de 355 p.p.m., sans comportement anormal du végétal [1].

Pour l'économie régionale, les accidents provoqués par le manganèse apparaissent moins graves que ceux liés à la chlorose calcaire et à son déficit en fer. Les traitements curatifs — pulvérisation de sulfate de manganèse en cas de déficience ou correction de l'acidité du sol en cas d'excès — sont bien connus et leur efficacité est assurée.

### 2. 3. – *Le Zinc*

Peu d'observations concernant le Zinc ont été faites dans le Sud-Est de la France. Toutefois, des accidents de carence ont été observés en divers points, sur vergers de pommiers et de cerisiers, notamment dans les Pyrénées-Orientales (DELMAS, 1953). Dans ce dernier cas, il s'agissait de vergers installés dans la haute vallée du Tech, sur des formations schisteuses, donnant des sols à éléments très grossiers, sans profondeur, neutres, mais dépourvus de calcaire. Sur les arbres déficients, les teneurs des feuilles en zinc descendaient à 12 p.p.m. (cerisier) et à 10 p.p.m. (pommier).

En Corse, on a signalé un effet bénéfique des pulvérisations de zinc sur les agrumes installés sur un sol fersiallitique (ECREMENT, 1969).

[1] Station d'Agronomie, C. R. A. d'Avignon-Montfavet. I. N. R. A. Travaux non publiés.

En d'autres secteurs, où une insuffisance en zinc était présumée, on a relevé dans des feuilles de cerisiers des teneurs de 23 p.p.m. (terrasses remaniées du Rhône moyen) et 46 p.p.m. (lithosol acide de l'Hérault), sans que les arbres réagissent aux apports de zinc (1).

Les sols acides apparaissent toujours relativement peu pourvus en zinc : 2 p.p.m. dans la vallée de l'Eyrieux, 8,4 p.p.m. dans les sols fersiallitiques des terrasses (Zn échangeable à pH 7). En sols calcaires, les taux peuvent être légèrement plus élevés, et atteindre 13 p.p.m. dans les sols d'alluvions. Les teneurs des organes végétaux sont alors sensiblement plus fortes et peuvent atteindre 70 p.p.m. Il n'a pas été relevé d'accident caractérisé, lié au zinc, en milieu calcaire. Toutefois, en certains sols marneux, décapés lors d'opérations de nivellement pour la mise en place de vergers, on a pu voir apparaître les symptômes généralement attribués à une carence en zinc sans qu'un diagnostic formel ait pu être établi (1).

Des essais d'apport de zinc par pulvérisation ont été effectués dans la moyenne vallée du Rhône sur culture de maïs installée sur un sol brun faiblement calcaire. Les teneurs des feuilles de maïs en zinc ont subi une forte augmentation, passant de 43 p.p.m. à 98 p.p.m., mais le rendement en grain n'a pas subi de variation sensible (1).

### 2. 4. – *Le Cuivre*

Le Cuivre a été longtemps le principal agent de lutte contre les maladies cryptogamiques de la vigne, des arbres fruitiers et des cultures maraîchères. Du fait des apports répétés qui ont ainsi été pratiqués pendant des dizaines d'années, on ne signale généralement pas de carence en cuivre dans les sols cultivés de la région. C'est dans les zones d'agriculture moins intensive des Cévennes, sur les lithosols et les sols bruns acides, que l'on observe les taux de Cu échangeable les plus faibles (3-4 p.p.m.), sans qu'il en résulte des difficultés.

Par contre, l'accumulation du cuivre dans le sol par suite des traitements anticryptogamiques peut se révéler néfaste. Des accidents par toxicité apparaissent ainsi dans les sols de pH inférieur à 7, où les apports parallèles de soufre, en augmentant l'acidité du milieu, exagèrent les effets nuisibles du cuivre. Dans les sols calcaires, au contraire, l'accumulation du cuivre paraît sans danger.

Les premières observations de toxicité furent faites dans la vallée alluvionnaire du Reyran, près de Fréjus (DROUINEAU et MAZOYER, 1953), sur des cultures annuelles succédant à un vignoble. Les conditions de milieu sont rappelées dans le tableau 3.

TABLEAU 3

*Teneur en Cu échangeable des sols de Fréjus*

| | Cu échangeable p.p.m. | pH |
|---|---|---|
| Glaïeuls sains ..... | 110 | 6,2 |
| malades ..... | 130 | 4,5 |
| Épinards sains ..... | 80 | 5,9 |
| malades ..... | 98 | 4,7 |

(1) Station d'Agronomie, C. R. A. d'Avignon-Montfavet. I. N. R. A. Travaux non publiés.

A la suite de ces premières observations, on a pu relever des difficultés identiques en divers points de la région lorsque des sols acides ont reçu de façon analogue des apports copieux de cuivre et de soufre : vergers de la vallée de l'Eyrieux (Ardèche), vignobles du Roussillon (VIDAL et MARCELIN, 1966) et de la Costière-du-Gard (RUTTEN, 1964). La toxicité se manifeste lorsqu'une culture annuelle succède aux arbres fruitiers ou à la vigne. Elle est généralement plus accentuée dans les zones caillouteuses des terrasses, où du fait de l'importance des galets la proportion relative de terre fine est plus faible.

### 2. 5. – *Le Bore*

Le problème de l'alimentation en bore a été soulevé en plusieurs points du Sud-Est, à l'occasion de symptômes anormaux observés sur diverses productions.

En 1954, on a reconnu dans le Roussillon que certains accidents sur vigne, décrits jusqu'alors sous le nom de « Plomb », étaient justiciables d'un apport de borax au sol. Ces accidents, localisés sur les vignobles installés en sols acides, présentaient toutefois une fréquence et une gravité beaucoup plus grande sur les sols fersiallitiques des terrasses que sur les sols schisteux de Banyuls (BRANAS et BERNON, 1954).

Cependant, c'est la rapide extension des cultures fruitières dans le Sud-Est et l'apparition de certaines anomalies sur l'appareil végétatif ou sur les fruits qui a principalement attiré l'attention sur l'alimentation en bore des cultures. Le problème, d'abord soulevé en Costière-du-Gard (RUTTEN, 1964), fut ensuite repris par les Stations d'Agronomie de l'I. N. R. A., en ce qui concerne la dynamique de cet élément dans le sol (CORNILLON, 1967) et son importance pour la production fruitière (HUGUET, 1964).

L'étude des teneurs en bore du sol montre qu'en de nombreuses situations les réserves sont relativement faibles (tabl. 4). En outre, les conditions climatiques de sécheresse et de chaleur de la période estivale dans le Midi, freinent leur mobilisation.

TABLEAU 4

*Teneur en Bore des divers sols du Sud-Est*

| | Bore total (p.p.m.) | Bore soluble (p.p.m.) |
|---|---|---|
| Vallée de l'Eyrieux (Ardèche)<br>Sol brun acide | 8,5 | 0,12 |
| Costière du Gard<br>Sol fersiallitique | 21,0 | 0,31 |
| Alluvions Durance<br>Sol brun calcaire | 51,9 | 0,38 |
| Balaruc<br>Sol halomorphe | 35,2 | 1,29 |

*Les sols acides* ont les teneurs en bore les plus faibles et les cultures qu'ils supportent présentent les taux les plus bas. On a ainsi relevé des taux de 8 p.p.m. sur cerisiers, de 13 p.p.m. sur vignes dans les sols fersiallitiques de la rive droite du Rhône

moyen, et de 22 p.p.m. sur pommiers installés sur des sols bruns acides (département de l'Ardèche) (1). Dans ces situations, la pulvérisation de solutions boratées sur la végétation exercerait, selon certains observateurs, un effet favorable sur le développement des cultures.

Dans la Costière-du-Gard, on a décrit des symptômes anormaux attribués à un déficit en bore, provoquant de graves accidents sur les espèces végétales particulièrement sensibles (par ex., Betterave fourragère).

*Les sols neutres ou calcaires* sont généralement mieux pourvus et les déficits d'alimentation boratée y sont exceptionnels. Cependant, sur un sol brun neutre, formé sur des apports d'origine glaciaire, dépourvu de calcaire, on a noté un taux de 4,5 p.p.m. dans les feuilles de pommiers. En Haute-Savoie, sur céleri-rave, en sol faiblement calcaire, on a relevé dans la racine un taux de bore de 40 p.p.m., considéré comme satisfaisant, mais une forte teneur en Ca entraînait un déséquilibre du rapport Ca/B (1).

Des carences ont pu également être diagnostiquées dans la région niçoise dans des cultures d'œillets installées sur des sols calcaires squelettiques dépourvus de matière organique : les taux de bore dans le végétal descendent à 10-15 p.p.m. dans les plants malades, tandis qu'ils sont de 20-25 p.p.m. dans les plants sains (MOULINIER, 1969).

Il existe d'ailleurs une relation étroite entre le bore soluble du sol et sa teneur en matière organique. La relation a été établie pour les *sols calcaires* de la moyenne et de la basse vallée du Rhône (1). L'examen statistique a porté sur 60 échantillons présentant un intervalle de 0,1 à 1,5 p.p.m. pour les taux de bore et de 0,5 à 5 p. 100 pour les taux de matière organique. Le coefficient de corrélation entre ces deux données est $r = 0{,}89$ et elles sont reliées par l'équation :

$$Y = 0{,}10 + 0{,}28\ x$$

$Y$ = teneur en bore soluble en p.p.m.

$x$ = teneur en matière organique (p. 100)

*Dans le Sud-Est de la France,* un déficit en alimentation boratée peut donc apparaître dans des situations variées, mais des observations rigoureuses sont nécessaires pour formuler un diagnostic de carence.

L'utilisation de quantités excessives de bore à titre préventif, pour remédier à un déficit éventuel, peut parfois se révéler dangereuse. A Antibes (MOULINIER, 1969), on a noté des symptômes de toxicité sur des plants de *Strelitzia* renfermant 700 p.p.m. de bore. En Costière-du-Gard, par contre, en parcelles expérimentales, il a fallu des apports répétés de bore, totalisant 540 kg/ha en 5 ans pour observer un léger effet dépressif sur haricot, tandis que le chou-fleur et la laitue avaient un comportement normal (RUTTEN, 1969). Il demeure que l'emploi systématique du bore peut se trouver limité par la sensibilité particulière de certaines cultures.

### 2. 6. – *Le Molybdène*

Les premiers aménagements réalisés par la C. N. A. B. R. L., ont permis en 1959 de reconnaître de très graves carences en Molybdène sur les sols fersiallitiques de la Costière-du-Gard. Alors que les cultures pratiquées antérieurement ne manifestaient

(1) Station d'Agronomie, C. R. A. d'Avignon-Montfavet. I. N. R. A. Travaux non publiés.

aucun symptôme particulier, les accidents apparurent avec les premières tentatives de cultures maraîchères (melon, chou-fleur) et les essais d'implantation de luzerne (RUTTEN, 1964).

Ces accidents reproduisaient les symptômes classiques de déficience en molybdène. Ils pouvaient être corrigés, soit par une recarbonatation préalable du sol, soit par des pulvérisations de molybdate d'ammonium. Le diagnostic apparaissait ainsi certain, mais les difficultés de dosage du molybdène ne permirent pas à l'époque de compléter ces observations par des données analytiques.

Après les constatations faites en Costière-du-Gard, des cas identiques furent observés en Crau, où les producteurs de melon de la région de Cavaillon venaient chercher des sols indemnes de parasites. Mais la décalcification des sols de Crau étant plus limitée, la gravité des accidents était moindre.

Enfin, des observations semblables ont été faites, toujours sur cultures de melon, dans des sols détritiques à pH 7, mais dépourvus de calcaire, sur les contreforts du plateau de Vaucluse (GOUNY *et al.*, 1962).

Les déterminations ultérieures de Mo échangeable faites dans les sols présentant ces accidents, ont révélé des taux de 0,10 à 0,14 p.p.m. en Costière-du-Gard et de 0,28 p.p.m. dans les sols de Vaucluse. Dans les plants de melon carencés, les taux de Mo étaient de 0,3 à 0,7 p.p.m. Après pulvérisation de molybdate, ils pouvaient s'élever à des niveaux compris entre 3 et 8 p.p.m.

Si la carence en molybdène présente un caractère spectaculaire pour les espèces végétales indiquées ci-dessus (melon, chou-fleur, luzerne), il est plus difficile de déceler dans les mêmes situations, l'insuffisance d'alimentation en molybdène pour les autres cultures. Cependant, les plantes sensibles permettent de mettre ainsi en évidence les faibles disponibilités en cet élément des sols des terrasses fluviatiles.

### 2. 7. — *Le Chrome*

Dans le Sud-Est, l'utilisation en horticulture traditionnelle des déchets de cuir peut s'accompagner d'apport de quantités non négligeables de chrome. Les accidents éventuels que pourrait provoquer cet élément sur la végétation ont fait l'objet d'études particulières (MOULINIER et MAZOYER, 1968).

## CONCLUSION

La diversité des conditions de milieu et la variété des cultures qui caractérisent le Sud-Est de la France ne permettent pas de donner une image simple du rôle joué par les oligo-éléments dans le Sud-Est de la France. Dans des secteurs géographiquement voisins, un même élément peut donner suivant le cas des manifestations de carence ou de toxicité.

Dans les sols acides ou lessivés, il est permis de présumer des insuffisances pour la plupart des oligo-éléments à l'exception du fer et du manganèse, ce dernier pouvant être au contraire excédentaire. Mais le diagnostic demeure souvent incertain, les diverses espèces végétales s'accommodant de façon différente des faibles disponibilités du milieu. Pour les sols calcaires, au contraire, c'est le fer et le manganèse qui posent les plus graves problèmes.

Le cas du cuivre nécessite une mention spéciale, car, en de nombreux endroits, l'occupation du sol par la vigne pendant de longues années a entraîné une modification des conditions initiales.

Ces données générales sont insuffisantes pour servir de guide à l'agriculteur du Sud-Est de la France dans l'utilisation rationnelle des oligo-éléments. Celle-ci implique dans chaque cas la connaissance des disponibilités du sol et des besoins des cultures. L'intensification constante de nombreux secteurs de l'agriculture méridionale, qui cherche à se libérer des contraintes du milieu naturel, peut toutefois faire apparaître de nouveaux déséquilibres et nécessiter de nouvelles interventions.

*Reçu pour publication en juin 1970.*

## SUMMARY


### EXAMPLES OF REGIONAL PROBLEMS

### III. — THE SOUTH-EAST

A brief recalling about the essential characteristics of the South-Eastern region of France shows the diversity of environmental conditions, particularly as regards geological structure and soil evolution. This diversity is the reason for the scattering of the data on trace elements.

The large size of the areas occupied by calcareous soils is underlined. In such formations, calcareous iron chlorosis often appears on vines and on fruit trees.

Manganese deficiencies, likewise, are observed in calcareous soils, especially where there are accumulations of organic material. Manganese toxicity is relatively frequent in acid soil occupied by vines.

Accidents caused by deficiencies of zinc and of copper are very rare. However, in acid soils, accumulation of copper due to the use of fungicidal powders on vines can cause accidents due to poisoning.

Boron has sometimes been held responsible for various accidents to vegetation. Studies on the behaviour of this element in soils have shown that the possibilities of deficiency are in fact rare.

Molybdenum deficiency has appeared in the form of spectacular deficiencies in certain market gardens set up in newly irrigated perimeters in acid soils.


## ZUSAMMENFASSUNG


### BEISPIELE VON REGIONALPROBLEMEN

### III. — SÜDOST-FRANKREICH

Es wird in Kürze auf die wesentlichen Charakteristiken der Gegend Südost-Frankreich mit ihrer grossen Verschiedenheit der Milieubedingungen, namentlich hinsichtlich der geologischen Struktur und der Entwicklung der Böden eingegangen. Diese Mannigfaltigkeit ist die Ursache der Streuung der beobachteten Werte betreffend die Spurenelemente.

Der bedeutende Anteil an Kalkböden wird unterstrichen. In diesen Bodenbildungen wird oftmals kalkige Ferrichlorose auf Rebstöcken und Obstbäumen festgestellt.

In kalkigen Böden wird ebenfalls Mangel an Mangan, besonders im Falle der Anhäufung von organischem Material, beobachtet. Die Mangangiftigkeit tritt ziemlich häufig in den saueren Böden, auf, die mit Rebstöcken bepflanzt sind.

Der Mangel an Zink und Kupfer verursacht sehr selten Krankheiten. In den saueren Böden dagegen kann die durch die fungiziden Spritzungen verursachte Anhäufung von Kupfer Unfälle durch Vergiftung hervorrufen.

Manchmal wurde das Bor für verschiedene Unfälle der Pflanzen verantwortlich gemacht. An Hand von Untersuchungen über das Verhalten dieses Spurenelementes in den Böden wurde gezeigt, dass diese Mangelmöglichkeiten selten auftreten.

Der Mangel an Molybdän hat sich durch auffallende Krankheiten bei gewissen Gemüsekulturen geäussert, die auf saueren Böden und bewässertem Neuland angelegt wurden.

## РЕЗЮМЕ

*Примеры областных задач.* III. *Юго-Восток.*

П. ГУНИ, П. КОРНИЙОН.

Краткий перечень главных характеристик Юго-Востока Франции, показывает на невероятное разнообразие условий среды этого района, особенно в смысле структуры и геологической эволюции почв. Оно и является главной причиной дисперсии наблюдений над микроелементами в этом районе.

В данном труде подчеркиваются крупные размеры площадей занятых известковыми почвами. В этих образованиях часто наблюдается появление железо-известкового хлороза на виноградниках и на фруктовых деревьях.

На известковых почвах наблюдаются также дефициты марганца, особенно в случаях накопления органического вещества. Марганцевая токсичность часто наблюдается в кислых почвах занятых виноградниками.

Неблагоприятные явления связанные с дефицитом цинка или меди, очень редки. И только в кислых почвах, накопление меди от опрыскиваний виноградников фунгицидами, может вызвать появление симптомов токсичности.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BRANAS J., BERNON G., 1954. Le Plomb de la vigne. Manifestation de la carence de bore. *C. R. Acad. Agr.*, 593-596.

CORNILLON P., 1967. Observations sur les possibilités de solubilisation du bore dans le sol. *Science du sol*, 81-91.

DROUINEAU G., MAZOYER R., 1953. Toxicité du Cuivre et évolution des sols sous l'influence des antiparasitaires. *C. R. Acad. Agr.*. 390-392.

DELMAS H. G., 1953. Le dépérissement des cerisiers dans la région de Céret. *C. R. Acad. Agr.*, 333-337.

ÉCREMENT F., 1969. Communication personnelle.

GOUNY P., MAZOYER R., 1953. Relations entre la nutrition minérale et les symptômes pathologiques dans la chlorose calcaire. *Ann. agron.* (4), 561-598.

GOUNY P., HUGUET F., MEYNADIER I., 1962. Observations sur la carence en molybdène. *C. R. des travaux des Stations d'Agronomie.*

HUGUET F., 1964. Le Bore dans la physiologie de l'arbre. Relations avec la qualité des fruits. *Congrès Pomologique*, 95e session, Nîmes, 101-114.

LÉVY J. F., 1964. Identification et étude par l'analyse foliaire de quelques carences alimentaires de la Vigne. *Colloque européen sur le contrôle de la nutrition minérale et la fertilisation.* Montpellier.

MOULINIER H., MAZOYER R., 1968. Contribution à l'étude de l'action du Chrome sur la croissance des végétaux. *Ann. agron.*, 19, 553-567.

MOULINIER H., 1969. Communication personnelle.

RUTTEN P., 1964. Relations entre les accidents de végétation dans la région du Bas-Rhône-Languedoc. *Congrès Pomologique*, 95e session. Nîmes, 118-123.

RUTTEN P., 1969. Compagnie du Bas-Rhône-Languedoc. Communication personnelle.

STATION d'AGRONOMIE d'Avignon-Montfavet. I. N. R. A. Travaux non publiés.

VIDAL J.-P., MARCELIN H., 1966. Étude de la carence manganique de la vigne en Roussillon. *Bulletin technique Chambre d'Agriculture des Pyrénées-Orientales*, nº 40, 95-99.

VIDAL J.-P., JUSTE C., DELAS J., MARCELIN H., 1969. Excès de manganèse et dépérissement de la vigne dans les sols acides du Roussillon. *Bulletin technique Chambre d'Agriculture des Pyrénées-Orientales*, 50, 3-19.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (5), 629-634.

# EXEMPLES DE PROBLÈMES RÉGIONAUX

## IV. — L'EST DU BASSIN PARISIEN

P. DUTIL

*Station d'Agronomie, 51 - Châlons-sur-Marne*
*Institut national de la Recherche agronomique*

RÉSUMÉ

Dans l'est du Bassin parisien, l'agriculture a atteint un niveau de production assez élevé, par suite de la mise en œuvre de conditions techniques éprouvées. Les conditions d'amélioration de la productivité des sols sont maintenant limitées ; toutefois, l'apport de certains oligo-éléments peut encore améliorer ou régulariser les rendements.

L'auteur examine tout d'abord deux problèmes importants en Champagne crayeuse : le cas du bore en grande culture, puis le cas du fer dans la zone viticole ; enfin, il signale les possibilités de carence en manganèse sur vigne et l'action favorable du zinc en culture de maïs.

## I. — GÉNÉRALITÉS

Le Bassin parisien reste toujours actuellement une région de grande culture caractérisée par un haut niveau de production.

Ce niveau élevé a été obtenu progressivement, tout d'abord par un travail régulier du sol, des amendements parfois, une bonne fertilisation minérale, puis par l'emploi de nouvelles variétés à fort rendement, avec un réajustement de la fumure minérale exigée par ces variétés, et enfin par l'emploi des herbicides et des traitements antiparasitaires.

Actuellement, les différentes techniques de travail du sol, de fertilisation et de traitements divers sont éprouvées et il semble que l'on soit parvenu à un certain état d'équilibre de production, dans des conditions naturelles parfois différentes. Le travail de l'homme a ainsi nivelé les hétérogénéités naturelles de surface, et sur le plan agronomique, les potentiels diffèrent assez peu ; ils restent parfois liés à l'économie en eau des sols, dont on cherche à combler le déficit par une irrigation de complément lorsque l'opération technique est possible et rentable.

Ainsi l'augmentation de la productivité devient maintenant plus difficile et les moyens nouveaux d'accroissement plus rares.

L'attention de l'agronome sur les éléments majeurs (N, P, K) et sur les méso-éléments (soufre, magnésium) est toujours soutenue ; mais il est un domaine encore assez mal exploité, c'est celui des oligo-éléments.

La présente note a pour but de faire le point sur cette question dans la partie orientale du Bassin parisien. La partie occidentale présente des problèmes particuliers en relation, soit avec la nature des cultures (maraîchage, arboriculture, liniculture), soit avec certains types de sols (ex. : sables de Sologne) et ne sera pas examinée ici.

## II. — LE PROBLÈME DES OLIGO-ÉLÉMENTS DANS LES DIFFÉRENTS SOLS

Dans l'est du Bassin parisien, on peut distinguer très sommairement deux matériaux primaires sur lesquels se sont développés les sols : d'une part, le limon des plateaux s'étendant depuis la Brie jusqu'au Pays de Caux, et d'autre part, les calcaires, dont la craie de Champagne reste l'unité la plus importante.

En ce qui concerne les limons du Bassin parisien, seule la carence en bore paraît les affecter. Cette carence est facilement localisable en culture de betterave où elle détermine la maladie du cœur noir. Les zones carencées apparaissent par taches, sans règle précise de distribution pédologique. Il est possible que les amendements calciques ou tout apport susceptible de relever le pH soient à la base de ces accidents (Jouis *et al.*, 1960). Dans ces sols de limons, l'intervention en période de végétation est effectuée avec succès par pulvérisation de solutions boratées (pentaborate de soude à 0,2 p. 100), et le traitement curatif est effectué par un apport au sol de 20 kg/ha de borate de soude.

En règle assez générale, il semble que dans la région des limons du Bassin parisien, une culture intensive, liée à une bonne fertilisation organique (fumiers de divers élevages et gadoues des villes principalement), ait limité l'ensemble des carences.

Par contre, le milieu calcaire présente des conditions chimiques beaucoup plus défavorables, et tout particulièrement les sols crayeux de la Champagne.

En effet, ces sols à pH très élevé (pH = 8 à 8,5) favorisent :

— l'insolubilisation du fer, ce qui provoque la chlorose ferrique dont le vignoble de Champagne est fortement affecté,

— l'immobilisation du bore dont les apports doivent être plus fréquents.

De plus, la Champagne crayeuse vient de subir depuis une vingtaine d'années une phase de défrichement intense ; la mise en culture de ces sols, naturellement pauvres, a suscité quelques inquiétudes et l'implantation de quelques essais, dont les résultats sont présentés.

## III. — RÉSULTATS DE QUELQUES ESSAIS EN CHAMPAGNE CRAYEUSE

Le défrichement des savarts et des bois de pins laisse un sol bien pourvu en matière organique (4 à 5 p. 100) mais à C/N élevé (12 à 13) qui, après quelques années de culture évolue vers une teneur moyenne de 3 à 3,5 p. 100 avec C/N voisin de 10. La teneur en calcaire total est de 65 à 70 p. 100 en moyenne, avec 20 à 30 p. 100 de calcaire actif. De tels sols sont naturellement pauvres, et de fortes fumures minérales en acide phosphorique et potasse (250 U/ha/an pendant 2 à 3 ans) sont appliquées au départ, l'acide phosphorique étant généralement appliqué sous forme de superphosphate de chaux.

L'assolement pratiqué est assez variable, mais se rapproche d'une conduite sur 9 ans avec les successions : betteraves, blé, colza, blé, orge, luzerne de 3 ans et blé.

### a. — *Carence en bore*

Dès les premières défriches d'après guerre, les cultures ont été principalement céréalières ; l'introduction de la betterave dans l'assolement a révélé aussitôt des carences en bore, partielles cependant, car la fertilisation azotée avec le nitrate de soude constituait un apport non négligeable de bore ; l'utilisation de borate de soude a été ensuite généralisée sur la base de 20 à 25 kg/ha, et les signes de carence ont disparu. Actuellement, on utilise également des engrais boratés.

Les apports sont effectués régulièrement avant la culture de la betterave, et parfois même avant la culture de la luzerne.

Il se pose cependant le problème de la fréquence des apports sur ces sols très calcaires, problème qui n'est pas encore résolu. Les études déjà réalisées (Cornillon, 1967) conduisent à penser à une précipitation chimique.

Les analyses effectuées (bore soluble à l'eau bouillante) sur sols recevant la dose classique de 20 à 25 kg de borate de soude tous les 3 ou 4 ans montrent que la teneur ne s'améliore pas ; ainsi se pose le problème de la durée de l'efficacité de l'apport correctif ; l'apport régulier à dose plus faible sera peut-être la solution la plus rationnelle dans ces sols de craie, d'une manière analogue à la fertilisation phosphatée.

Dans le cas du vignoble, des effets toxiques ont été observés par suite d'apports trop fréquents de borate de soude (observations C. I. V. C.).

### b. — *Carence en fer*

Les cultures de l'assolement de Champagne ne sont pas sensibles à la chlorose ferrique ; par contre, le vignoble est fortement atteint par la carence en fer, et principalement lorsque des périodes pluvieuses se manifestent en cours de floraison, et même parfois après ce stade.

Les investigations poursuivies montrent que les cas de chlorose ferrique observés sur le vignoble de Champagne correspondent à des sols à pH très élevé dans la zone radiculaire (pH conventionnel de 8,4 à 8,6), ce qui doit orienter les recherches principalement sur la physiologie de l'absorption et du transfert du fer chez les

plantes chlorosées (JUSTE *et al.*, 1967), le pouvoir chlorosant établi d'après les teneurs en calcaire actif apparaissant parfois insuffisant.

Étant donné l'importance des dégâts végétatifs occasionnés par cette carence sur une culture concernant un produit de qualité, de très nombreux essais sont effectués par apports divers : chélates (produits organiques séquestrant le fer, sels de divers acides EDTA, DTPA et EDDHA), sulfate ferreux ; certains de ces produits sont apportés au sol (ferlate, sulfate de fer), d'autres en pulvérisations.

Les différents essais, couplés parfois avec dosage du fer dans les pétioles, montrent une efficacité certaine de divers chélates en incorporation au sol. Mais cet effet ne dure que deux ans, trois ans au plus parfois ; au-delà de cette durée, les symptômes réapparaissent. Les traitements foliaires à base de séquestrants n'apportent qu'un reverdissement temporaire, et au cours d'une « année chlorosante », deux ou trois traitements sont nécessaires. Enfin, le sulfate ferreux apporté en poudre au sol n'a aucun effet ; par contre, apporté en masse dans la zone radiculaire, par un trou de sonde, et compacté, il a un effet plus durable ; mais là également, en 2 ans, le produit s'oxyde et se prend en masse.

Il semble donc qu'actuellement, le traitement curatif le plus efficace est constitué par les chélates en incorporation au sol.

### c. — *Carence en manganèse*

Dans les sols de limon, les conditions pédologiques maintiennent la présence de quantités suffisantes de manganèse actif ou de manganèse facilement réductible (BITTEL, 1957) et il n'y a pas de danger de carence.

Par contre, cet élément se trouve en faible quantité dans les sols calcaires, qui ont une bonne structure et sont bien aérés, donc en milieu peu réducteur. Mais les teneurs rencontrées sont généralement supérieures au seuil de carence le plus souvent admis (0,025 p. 1 000).

En Champagne, c'est encore la vigne qui présente les cas les plus fréquents de carence en manganèse (BADOUR et LÉVY, 1964). Actuellement, les zones atteintes sont traitées en pulvérisation foliaire, avec les liquides fongicides contenant du manganèse, à raison de 500 g/hl et 5 kg/ha.

Des carences provoquées par l'application de doses trop élevées de produits séquestrants utilisés pour la chlorose ferrique ont également été signalées dans le vignoble.

*Cas particulier de la grande culture.*

En 1967, un essai destiné à tester l'efficacité des apports d'oligo-éléments en sols de craie a été mis en place, les apports ayant été effectués, séparément, aux doses usuelles, sur culture d'orge. Il a été constaté une amélioration du rendement dans le cas de l'apport du manganèse uniquement, mais pour 3 blocs sur 4 seulement ; reconduit l'année suivante selon le même protocole, cet essai n'a pas confirmé les résultats précédents.

Il semble donc encore difficile d'apprécier les besoins en oligo-éléments pour les sols de craie.

### d. — *Cas du zinc*

Dans les alluvions calcaires des vallées de la Marne, la culture du maïs s'implante progressivement. Bien qu'il n'y ait pas de symptômes de carence, des essais d'apport

de zinc ont été effectués par des groupements techniques ; il apparaît ainsi que cet élément apporté en traitement foliaire (à la dose de 1,5 p. 100 de sulfate de zinc, à raison de 1 500 l/ha) provoque une amélioration de rendement, mais sur certaines variétés seulement. Les essais doivent être poursuivis avant d'extrapoler ces résultats.

## CONCLUSION

Dans l'est du Bassin parisien, les carences en oligo-éléments sont variables en fonction du milieu naturel.

Les sols de limons paraissent affectés uniquement par la carence en bore, d'une manière irrégulière ; actuellement, cette carence est facilement traitée par l'emploi du borate de soude apporté au sol ou par pulvérisations foliaires de pentaborates.

Les sols calcaires et principalement les sols de la Champagne crayeuse sont plus sensibles à ces phénomènes de carence. En particulier, le vignoble de Champagne est parfois assez fortement touché par la chlorose ferrique, que l'on traite assez efficacement par l'utilisation de chélate de fer mais pour une durée limitée.

La carence en manganèse existe également dans le vignoble et est facilement combattue lors des traitements fongicides. Pour les grandes cultures de la région crayeuse, l'apport de bore est nécessaire, mais il se pose le problème de la fréquence et de la dose des apports. Enfin, les effets du zinc sur maïs sont encore au stade des essais pour les phénomènes de sub-carence en sol calcaire.

*Reçu pour publication en juin 1970.*

## SUMMARY

EXAMPLES OF REGIONAL PROBLEMS. IV. — THE EAST OF THE « BASSIN PARISIEN »

In the East of the Paris Basin, agriculture has reached a fairly high level following the application of well-tried technical conditions. There is a limit at present to what can be done to improve soil productivity, but the introduction of certain trace-elements may further raise or regularize yields.

The author examines first two important problems in chalky soils of Champagne, viz, the case of boron in large-scale farming and that of iron in the vine-growing area. Finally, he indicates the case of manganese deficiency in vine growing, and the improvements in maize production due to use of zinc.

## ZUSAMMENFASSUNG

BEISPIELE VON REGIONALPROBLEMEN

IV. — DER OSTEN DES PARISER BECKENS

In der östlichen Gegend des Pariser Beckens hat die Landwirtschaft infolge der Anwendung von erprobten technischen Verfahren ein recht gutes Erzeugungsniveau erreicht. Die Verbesserungsmöglichkeiten der Bodenerträge sind jetzt begrenzt. Die Zufuhr von bestimmten Spurenelementen kann jedoch die Erträge noch verbessern oder regulieren.

Zunächst untersucht der Verfasser zwei wichtigen Probleme in der kreidigen Champagne : die Anwendung des Bors in umfangreichen Kulturen, die Anwendung des Eisens im Weingebiet. Schliesslich wird über den Mangel an Mangan im Weinberg berichtet sowie über Verbesserungen von Maiskulturen durch Zufuhr von Zink.

## РЕЗЮМЕ

*Примеры областных задач.* IV. *Восток Парижского Бассейна.*

И. ДЮТИЛЬ.

В восточной части Парижского Бассейна сельское хозяйство достигло довольно высокого уровня продукции, благодаря применению техники уже себя оправдавшей. Условия увеличения продуктивности почв теперь уже ограничены в этом районе; однако, внесение в почву некоторых микроэлементов еще может улучшить или упорядочить урожайность.

Автор рассматривает прежде всего две важных для меловой Шампани задачи : внесение бора под крупные культуры и железа в винодельческой зоне; и, наконец, отмеченную недостаточность марганца в виноградниках и улучшение культур кукурузы с помощью цинковых подкормок.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Badour C., Lévy J.-F., 1964. Identification et traitement de carences en manganèse sur vigne en Champagne. *Coll. Europ. sur le contrôle de la nutrition minérale et de la Fertilisation*, 28 sept.-3 oct., 165-166.

Bittel R., 1957. Étude d'une technique de détermination du manganèse actif du sol. Résultats expérimentaux. *Ann. agron.*, **1**, 91-109.

Cornillon M., 1967. Observations sur les possibilités de solubilisation du bore dans le sol. *Sc. Sol.*, **1**, 81-101.

Jouis E., Lecacheux M.-Th., Gauchy F., 1960. Influence du pH sur la carence en bore des betteraves et des lins dans les sols de limon du Pays de Caux. *C. R. Acad. Agric.*, 248-253.

Juste Ch., Pouget R., Bruzeau F., 1967. Influence du pH et de l'anion bicarbonique sur l'absorption du fer par les racines de vigne. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **264**, 2781-2784.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (5), 635-669.

# LES CARENCES EN OLIGO-ÉLÉMENTS CHEZ LES RUMINANTS EN FRANCE. LEUR DIAGNOSTIC. LES PROBLÈMES SOULEVÉS PAR L'INTENSIFICATION FOURRAGÈRE

Simone PÉRIGAUD

*Station de Physiopathologie de la Nutrition,*
*Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 63-Saint-Genès-Champanelle*
*Institut national de la Recherche agronomique*

## RÉSUMÉ

Les carences en oligo-éléments des ruminants sont mal connues en France parce que difficiles à diagnostiquer. Leur cartographie systématique pourrait aider le praticien à les identifier ; dans ce but, la localisation sur le territoire métropolitain de types de sols habituellement carencés à l'étranger a été entreprise ; une enquête auprès des vétérinaires et des éleveurs est en cours. Les premiers résultats de cette étude à peine amorcée révèlent l'existence presque certaine de subcarences en cuivre sur les sols légers acides ou les roches très altérées.

Mais l'intensification fourragère modifie profondément les rapports sol-plante ; le recours à des espèces sélectionnées, à la fertilisation, à l'irrigation... peut aggraver les carences naturelles ou révéler de nouvelles carences sur l'animal qui ne reçoit pas par ailleurs une complémentation minérale convenable. La fertilisation en cuivre des prairies peut être une solution valable, mais dans des limites restant à préciser, variables avec la nature de la flore.

## INTRODUCTION

Les carences en oligo-éléments du bétail sont répandues dans certains pays, particulièrement en Australie, en Nouvelle Zélande, aux U. S. A. et dans les pays du nord de l'Europe, Écosse, Irlande, Suède, Norvège, Allemagne du Nord, etc. Chez nos voisins plus proches, Belgique et Hollande, des carences complexes sont apparues ces dernières années, liées à l'intensification de la production agricole et industrielle. En France, les carences ne sont ni généralisées ni très aiguës, elles n'ont pas encore posé de problème grave — sauf pour le sélénium — et, en l'absence d'études

systématiques jusqu'à ce jour, elles font souvent l'objet d'opinions et d'interprétations contradictoires fantaisistes.

Cependant le problème existe : la bibliographie étrangère nous laisse supposer des possibilités de carences, liées aux types de sols, dans certaines régions. Ces difficultés peuvent ne se déclencher qu'à partir d'un certain niveau de production animale. Certains éleveurs — de très bons éleveurs — subissent des incidents qu'ils n'arrivent pas à bien éliminer ; l'orientation de l'élevage vers une rentabilité toujours accrue rend donc indispensable l'extension aux autres oligo-éléments des études déjà entreprises par notre Station depuis quatre ans sur le sélénium.

Nous préciserons, dans les pages qui suivent, comment se pose le problème du diagnostic des carences en oligo-éléments chez les ruminants en France et comment son étude est abordée actuellement (1) par le biais d'une cartographie systématique reliant l'apparition des carences animales à des types de sols définis. La liaison sol-animal reste toutefois liée à la nature et aux conditions de culture des fourrages : nous donnerons donc également quelques précisions sur les variations de composition en oligo-éléments des fourrages et l'influence de l'intensification fourragère sur l'alimentation animale. Quelques premiers résultats, encore limités, permettront d'illustrer ces principaux thèmes.

Dans toutes ces pages, nous insisterons surtout sur les aspects agronomiques du problème, en ne gardant, du domaine animal, que les bases nécessaires à la compréhension du reste.

## I. — LES CARENCES EN OLIGO-ÉLÉMENTS CHEZ LES RUMINANTS ; LE DIAGNOSTIC — LES THÈMES D'ÉTUDES EN COURS

Pour l'éleveur, tout incident, quel qu'il soit, se traduit en trois termes : diagnostic, prophylaxie et traitement. C'est l'une ou l'autre de ces étapes qui peut, selon la maladie, être difficile à franchir.

Les carences en oligo-éléments ne posent pas de problème grave au niveau des deux dernières ; les méthodes préventives et curatives, si elles nécessitent encore de sérieuses mises au point avant de pouvoir être appliquées efficacement, relèvent d'essais relativement faciles à concevoir.

Par contre, mise à part la carence en sélénium, le vétérinaire bute sur le diagnostic, qu'il s'agisse de diagnostic clinique (symptômes) ou analytique.

### 1. — *Le diagnostic clinique : les symptômes de carence*

Le tableau 1 résume, pour tous les oligo-éléments dont la présence a été démontrée comme indispensable à l'animal (2), les symptômes caractéristiques de leur

(1) Ces travaux sont menés depuis deux ans par une équipe de recherche qui comprend un agronome, un vétérinaire (M. LAMAND) et un chimiste (M. BELLANGER). Les résultats d'analyse fournis dans le texte proviennent du laboratoire de M. BELLANGER.

(2) Le rôle indispensable du fluor n'est pas bien démontré ; sa carence tendrait, chez l'homme, à augmenter l'importance des caries dentaires qui seraient plutôt dues, chez l'animal, à un excès de cet élément, mais sans constituer un problème réel pour l'élevage (UNDERWOOD, 1966).

carence (on trouvera plus de détails dans l'article de LAMAND, 1970). La myopathie (carence en sélénium) est facilement reconnaissable. Les symptômes des autres carences sont multiples et non spécifiques :

— leur multiplicité (8 pour le cuivre) ne veut pas dire qu'ils existent tous à la fois sur l'animal atteint ; le profil décrit correspond à la somme de ce qui peut être rencontré, mais il est différent d'un pays à l'autre (par exemple pour la carence en cuivre, ce sont surtout des accidents cardiaques en Australie, nerveux en Angleterre, articulaires et osseux et des décolorations de poils aux U. S. A., etc.) ;

— de plus, en région de subcarence, le comportement individuel prend toute son importance, et seuls, dans un troupeau, deux ou trois animaux peuvent présenter un seul signe clinique. Souvent on ne constate que de l'infertilité... qui peut avoir bien d'autres causes. A la limite, tous les symptômes disparaissent, seul persiste un niveau de production faible, difficile à apprécier ;

— ces symtômes ne sont pas spécifiques ; non seulement les mêmes peuvent relever de deux oligo-éléments distincts (pica — anémie = Cu ou Co ; troubles de l'ossification = Cu ou Mn, etc.), mais la plupart d'entre eux sont aussi caractéristiques de carence en énergie, en azote, en phosphore, ou de mauvaises conditions d'élevage (diarrhée, anémie et parasitisme).

### 2. — *Le diagnostic analytique*

On trouvera précisé au tableau 1 dans quel type de prélèvement, animal ou végétal, il est souhaitable de pouvoir faire un dosage.

a) *L'analyse de foin* (ou de tout aliment entrant en proportion importante dans la ration de base) est un élément essentiel du diagnostic. Elle permet de comparer les quantités ingérées aux besoins des animaux.

Les besoins (tabl. 1) définissent, pour chaque oligo-élément, des *seuils de carence*, c'est-à-dire les teneurs limites au-dessous desquelles les fourrages distribués ne doivent pas descendre (tabl. 2).

A l'opposé, la plupart de ces éléments peuvent devenir rapidement toxiques pour le bétail, d'où la définition de *seuils de toxicité* (même tableau).

Un foin doit donc se situer entre ces deux seuils. Malheureusement l'interprétation d'un résultat analytique n'est pas aussi simple car :

1° Les besoins des animaux ne sont pas toujours très bien connus (d'où les écarts importants notés dans le tabl. 2) ; ils sont en effet définis le plus souvent d'après l'analyse des fourrages dans les régions où des carences se manifestent. Mais, en fait, dans le cas de petits animaux pour lesquels la distribution de rations expérimentales synthétiques est possible, on constate que les besoins au pâturage sont différents des besoins expérimentaux. Par ailleurs, la croissance des jeunes, le maintien d'une bonne fertilité chez l'adulte, correspondent à des besoins plus élevés que la moyenne ; les doses thérapeutiques sont également beaucoup plus fortes que la normale.

2° Les carences ne sont pas toutes « primaires », c'est-à-dire dues à l'insuffisance de l'oligo-élément dans la ration, elles sont parfois « secondaires », induites par la

TABLEAU I

*Carences en oligo-éléments chez les ruminants*

| Élément | Age du malade | Symptômes | | | | | | | | | | | | Diagnostic de la carence par dosage de l'élément dans | Besoins bovins mg/jour ou p.p.m. M. S. ration (1) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Troubles croissance Chute production lait | Inappétence | Pica | Goître | Anémie | Diarrhée | Troubles osseux | Troubles nerveux | Troubles cardiaques | Myopathie | Troubles de la fertilité | Troubles du pelage | Troubles de la peau | |
| Fer | Adulte | | | | | | | | | | | | | | Plasma |
| | Jeune | × | | | | × | | | | | | | | | Foins | 50-60 mg/j<br>30 mg/j |
| Cuivre (2) | Adulte | × | | × | | × | × | × | | × | | × | × | | Plasma<br>Foie<br>Foins<br>Poils | 10 à 20 p.p.m. selon taux de molybdène |
| | Jeune | × | | × | | × | × | × | × | × | | | × | | | |
| Cobalt | Adulte | × | × | × | | × | | | | | | | × | | Plasma<br>Foie<br>Foins | 0,1 p.p.m. |
| | Jeune | × | × | × | | × | | | | | | | | | | |
| Iode | Adulte | × | | | × | | | | | | | × | | × | Plasma<br>Foins | 1 à 20 mg/j |
| | Jeune | × | | | × | | | | | | | × | × | × | | |
| Manganèse | Adulte | × | | | | | | × | | | | × | | | Poils<br>Foins | 50 p.p.m. |
| | Jeune | × | | | | | | × | × | | | | | | | |
| Zinc | Adulte | × | × | | | | | | | | | × | | × | Plasma<br>Foins | 50 p.p.m. |
| | Jeune | × | × | | | | | | | | | mâle | × | × | | |
| Sélénium | Adulte | | | | | | | | | | | | | | Plasma<br>Foins | 0,1 p.p.m. |
| | Jeune | × | | | | | | | | × | × | | | | | |

(1) Les besoins sont calculés avec des unités très différentes selon les auteurs.

(2) Le molybdène en excès entraîne une mauvaise utilisation du cuivre, donc des symptômes de carence en cuivre ; sa carence provoque une toxicité en cuivre (sur ovins).

présence d'un autre facteur alimentaire qui gêne l'utilisation métabolique normale de l'oligo-élément ingéré. Ainsi (1) :

— il existe une carence cuprique induite par un excès de molybdène : « teart di-

TABLEAU 2

*Les oligo-éléments dans les foins et les seuils caractéristiques pour le bétail*

| | Teneurs extrêmes des foins (p.p.m. M. S.) | Seuils de carence animale (p.p.m. M. S. ration) | Seuils de toxicité animale (p.p.m. M. S. ration) |
|---|---|---|---|
| Fe | 50-800 (moyenne 100-250) | *Bovins :* 4 à 5<br>*Ovins :* 10 à 15 | Antagonismes { Fe-Cu<br>Fe-P |
| Cu | 1-20 (moyenne 3,5-8) (jusqu'à 25 en zone industrielle) | *Bovins adultes :* 4-10 (1) (jusqu'à 14, sway-back ?)<br>*Jeunes bovins :* plus sensibles<br>*Ovins* { rustiques 4-6<br>Mérinos 7-8 | *Ovins :* 20-30<br>*Jeunes bovins :* 40-100<br>*Bovins adultes :* < 200<br>Antagonismes { Cu-Mo<br>Cu-Fe<br>Cu-Ca |
| Co | 0,05-1,1 | 0,10 | 90-160 mg/100 kg poids vif |
| I | environ 0,3 | *En lactation* : 0,12-12 (2)<br>*Autres* : 0,12-1,3 | hors lactation : 8 |
| Mn | 10-800 | 40 | Inconnu<br>Antagonismes Mn et Fe ou Mg ? |
| Zn | 10-100 | *Adultes :* 40-45<br>*Jeunes :* plus sensibles | 500 à 900<br>Antagonisme Cu-Zn<br>Ca-Zn<br>Mn-Zn |
| Se | 0,01-20 exceptionnellement 1 500 | 0,1 | 5 |
| Mo | 0,1-20 (jusqu'à 40) exceptionnellement : 300 | *Ovins*<br>0,03 (Nouvelle-Zélande)<br>0,1-0,2 → toxicité Cu avec Cu 10-20 p.p.m. (Australie) | *Bovins :* 2 à 15<br>*Ovins* : jusqu'à 20, moins sensibles<br>*Jeunes :* plus sensibles<br>Antagonismes { Cu-Mo, Mo-$SO_4$, K-Mo<br>3 : toxique avec Cu < 5<br>8 : non toxique avec { Cu > 7, $SO_4$ < 0,2 %<br>20 : toxique avec Cu = 20 |

(1) Le seuil de carence en cuivre est fonction du taux de molybdène (voir toxicité Mo), parfois de Ca et d'autres facteurs non identifiés (sway-back).

(2) Le seuil de carence en iode est fonction des substances goitrigènes présentes dans la ration.

(1) Références extraites de UNDERWOOD (1966).

sease » en Angleterre, « diarrhoes » en Hollande, Irlande, etc. En présence de molybdène, le seuil de carence en cuivre est relevé (voir tabl. 2, ligne molybdène) ;

— il existe aussi une carence en cuivre induite par un excès combiné de molybdène et de sulfate (Grèce, Nouvelle-Zélande, etc.) ; le facteur responsable n'est pas toujours identifié comme c'est le cas du sway-back dans le Royaume-Uni [1] et de troubles divers au voisinage de zones industrielles en Belgique [2] ;

— les carences en iode peuvent être déclenchées par des « substances goitrigènes » plus ou moins définies, etc.

Ce type de carences induites semble prendre de plus en plus d'importance, notamment dans les pays européens [2] où elles apparaissent complexes et mal connues. Dans ce cas, il est évident que l'analyse des foins ne peut pas être d'un grand secours.

3° L'analyse, toujours coûteuse, est difficile — les méthodes applicables en série dans les laboratoires français n'existent guère que pour le cuivre, le manganèse et le zinc. Les dosages du cobalt, et du molybdène ne peuvent encore être entrepris que sur un nombre très limité d'échantillons ; le dosage de l'iode ne donne pas encore satisfaction.

Enfin, il faut garder constamment en mémoire que les contaminations en oligo-éléments des fourrages et des foins sont faciles, ne serait-ce que par la terre, beaucoup plus riche en certains oligo-éléments que les végétaux. Or, un lot de foin peut avoir été particulièrement sali sans être représentatif de l'ensemble du fenil. Par ailleurs, l'assimilabilité du « contaminant » par l'animal a été peu étudiée.

Autrement dit, si l'analyse dépiste un foin au-dessous du seuil de carence habituellement reconnu, la carence est probable. Mais inversement, si le chiffre est normal, aucune conclusion sûre ne peut être tirée.

b) *L'analyse des tissus animaux* complète l'analyse du foin (tabl. 1). La carence en sélénium peut être dépistée avant même l'apparition des symptômes par un test biochimique sur le plasma (LAMAND, 1965). Pour d'autres oligo-éléments, notamment le cuivre et le cobalt, l'organe le plus représentatif est le *foie*, malheureusement peu accessible dans la pratique. Le *sang* ne traduit la carence que lorsque les réserves hépatiques sont épuisées, c'est-à-dire en cas de carence primaire déjà grave. Les *poils* sont utilisés pour le cuivre et le manganèse, intégrant les derniers mois d'existence de l'animal : ce sont *a priori* de très bons tests, mais les constituants mélaniques fixent aussi des oligo-éléments et les « seuils » ne peuvent être les mêmes pour toutes les couleurs de poils.

D'études récentes menées notamment en Combrailles (Puy-de-Dôme), il ressort que l'apparition de symptômes de carence en cuivre et l'existence de teneurs plasmatiques ou pilaires anormalement basses ne sont pas forcément liées sur le même individu : dans un troupeau, une vache peut être en très mauvais état et montrer des résultats d'analyses normaux, tandis que sa voisine apparemment en bon état, peut avoir un dosage en dessous du seuil. C'est au niveau du troupeau tout entier que la synthèse peut être faite, en mettant dans un même pool tous les symptômes et toutes les caractéristiques analytiques d'au moins 8 à 10 bêtes. *L'analyse indivi-*

(1) Références extraites de UNDERWOOD (1966).
(2) Références extraites de communications présentées au Congrès d'Aberdeen, juillet 1969 (non encore publié).

*duelle n'a aucune signification.* En Belgique, BIENFAIT et BINOT (Congrès d'Aberdeen, 1969) sont arrivés aux mêmes conclusions et ne travaillent plus que sur des moyennes.

### 3. — *Conclusions sur le diagnostic: les axes de recherches en cours (aspects agronomiques)*

Le diagnostic de la carence en oligo-éléments — sélénium mis à part — reste donc difficile. Pratiquement il faut faire appel au maximum de données possibles: examens cliniques, analyse du foin, analyse du sang et des poils sur un nombre suffisant d'animaux. En cas de carence, l'une au moins de toutes ces données est faible.

Dans l'état actuel des connaissances, il faut souvent faire appel au test thérapeutique, c'est-à-dire essayer tel traitement et juger de l'effet d'après la réaction, favorable ou non, de l'animal.

La complexité du problème nécessite finalement, outre l'examen clinique, un grand nombre d'analyses et d'interventions qu'il est pratiquement impossible de songer à généraliser.

Or l'existence de zones bien localisées de carences dans le monde révèle qu'elles sont liées le plus souvent aux conditions géographiques et notamment aux types de sol ; la pauvreté d'un sol en oligo-éléments disponibles se répercute sur la composition des végétaux qu'il porte et de là sur l'animal qui s'en nourrit. Certains types de sols produisent des fourrages dont la teneur en certains oligo-éléments est souvent inférieure au seuil de carence précédemment défini pour le bétail (UNDERWOOD, 1966 ; F. A. O., 1961, etc.).

La connaissance de ces sols « carencés » et leur localisation géographique en France — autrement dit leur cartographie — constituerait un outil de diagnostic supplémentaire pour le vétérinaire praticien ; étant dans une région de « carence probable », le vétérinaire décélerait plus facilement le moindre symptôme, même diffus : il pourrait diminuer le nombre des analyses indispensables, peut-être à la limite s'en dispenser totalement. Cette cartographie permettrait en outre d'envisager une prophylaxie systématique raisonnée et « régionalisée » des carences.

Mais la connaissance des sols ne suffit pas à résoudre tous les problèmes surtout lorsque l'on passe du stade où l'élevage est extensif à celui de l'élevage intensif. Comme l'a bien montré KERGUÉLEN (1960), un sol normalement pourvu en cuivre peut donner un fourrage annuel infiniment plus pauvre en cuivre qu'une prairie naturelle non fertilisée sur sol « carencé ». Il cite les chiffres suivants :

— sur sol carencé en cuivre (Normandie), une culture intensive de ray-grass d'Italie donne un fourrage à 0,7 p.p.m. de Cu (!) ;

— sur le même sol, les prairies naturelles à faible rendement et exploitées tôt, atteignent 7,3 p.p.m. ;

— sur sols « normaux », la culture très intensive n'atteint que 3 à 5 p.p.m., c'est-à-dire moins que la prairie extensive en sol pauvre.

Pour KERGUÉLEN (1962), le sol a beaucoup moins d'importance que l'espèce végétale et le stade. Dans quelle mesure l'augmentation considérable de la production par le recours à des espèces sélectionnées, l'accélération des rythmes de

coupe, les techniques de fertilisation, l'irrigation, etc., a-t-elle des répercussions sur les teneurs en oligo-éléments des fourrages? On ne peut pas ne pas tenir compte de ces facteurs qui, à notre avis, sont le complément indispensable des études de sols. Par ailleurs, les carences s'extériorisent plus certaines années que d'autres ; le fait est signalé dans les pays nordiques. En France et notamment en Normandie, certains ennuis chroniques qui ressemblent à des carences en cuivre ne sévissent qu'en certaines saisons et certaines années. La fréquence de la myopathie varie également, sa recrudescence suit en général une année humide (LAMAND, 1966). Les conditions météorologiques ne sont donc pas sans importance.

Sols et fourrages, tels sont donc les axes des préoccupations agronomiques actuelles dans le cadre des recherches en cours sur les carences en oligo-éléments des ruminants. Mais avant de les développer, nous résumerons les résultats des travaux dans le domaine animal.

### 4. — *Prophylaxie et traitement (aspect vétérinaire)* (LAMAND, 1970)

a) *Prophylaxie.*

— *Pour le sélénium,* la supplémentation des veaux se fait par injection de sélénite de sodium soit aux veaux eux-mêmes, à 15 jours et à 1 mois 1/2, soit aux mères avant la mise-bas. Une complémentation orale des mères (0,7 p.p.m. M. S. de la ration) suffit à protéger les veaux à la mamelle (LAMAND, 1965), mais dans l'état actuel de la législation, le sélénium, classé dans le tableau A des substances toxiques, n'est pas admis au titre d'additif alimentaire : il n'est utilisé qu'en médicament. La modification de la législation des aliments du bétail, devenue possible après la mise au point du dosage du sélénium (LAMAND, 1969), est en cours d'étude.

— *Pour le cobalt,* un comprimé d'oxyde de cobalt « Permaco » [1], placé dans le rumen, se solubilise lentement et couvre les besoins de l'animal pour 4 à 8 mois.

— *Pour les autres oligo-éléments,* la prophylaxie peut être menée de façon simple par la distribution d'un complément minéral renfermant les oligo-éléments ; les quantités d'oligo-éléments à apporter résultent d'un bilan entre les besoins (tabl. 1) et les apports par le fourrage (ou autres aliments de la ration de base), le concentré n'étant pas pris en considération puisqu'il est distribué en fonction de la production de l'animal. Les doses journalières étant déterminées, elles doivent être apportées par 100 g de complément minéral, mélange de phosphate bicalcique (60 p. 100), de chlorure de sodium (30 p. 100) et de sulfate de magnésium (10 p. 100).

La distribution de ce complément ne soulève pas de difficultés, en hiver à l'étable : elle peut se faire sur des aliments humides ou sur le concentré. Par contre, en été, dans les conditions traditionnelles de l'élevage au pâturage, les animaux ne reçoivent pas tous, des concentrés. La pierre à lécher convenablement enrichie — solution apparemment idéale — est en fait très irrégulièrement consommée par les animaux, elle ne peut donc couvrir les besoins de tout le troupeau et à la limite les risques de toxicité ne sont pas exclus pour certains individus (LAMAND, résultats non publiés).

C'est la raison pour laquelle l'étude des possibilités d'enrichissement en cuivre du fourrage sur pied nous a paru utile (voir plus loin).

[1] Nom déposé.

b) *Traitement.*

Les injections de sélénium arrivent à guérir un animal atteint de myopathie si le muscle cardiaque n'est pas touché.

— Pour les autres oligo-éléments, le traitement par injection n'est pas toujours efficace :

— la carence en cobalt ne peut être combattue chez le veau que sous forme de vitamine $B_{12}$ ; chez l'adulte, par contre, le cobalt est nécessaire, sous forme minérale, à la flore du rumen ;

— le cuivre, sous forme de sulfate, est très corrosif aux concentrations souhaitables, son utilisation sous forme chélatée est en cours d'étude. La distribution d'une solution de sulfate de cuivre est possible par la bouche ;

— cuivre, zinc, manganèse, iode, etc., peuvent plus simplement être distribués dans des compléments minéraux substantiellement enrichis (260 p.p.m. M.S. de la ration pour le zinc, 20 p.p.m. pour le cuivre, 100 p.p.m. de manganèse).

## II. — LA CARTOGRAPHIE DES CARENCES EN FRANCE

### 1. — *Les méthodes utilisées*

Elles peuvent faire appel à trois types de données : analyses de sols, comparaison des sols carencés à l'étranger et des sols français, localisation de carences animales en France.

a) *Une carte établie d'après des analyses de sols en oligo-éléments* est à première vue séduisante. Mais les publications étrangères, notamment de Nouvelle-Zélande, d'Australie, d'Allemagne de l'Est, de Russie, mettent en évidence qu'il n'existe pas de corrélation systématique entre la teneur en oligo-éléments (totaux, ou échangeables, ou assimilables) d'un sol et l'apparition des carences animales ; les deux types de cartes, là où elles existent (Nouvelle-Zélande), ne se superposent pas. Si une corrélation satisfaisante peut exister entre l'analyse de sol (avec tel extractif précis) et la réaction favorable des céréales à l'apport de cuivre dans certaines régions, comme en Bretagne (COPPENET, 1956), cette corrélation n'est plus que très lâche lorsqu'il s'agit de fourrages (MITCHELL, 1960) et n'existe visiblement plus lorsque l'on sort du contexte régional. Cette méthode ne nous apparaît donc pas devoir être féconde, employée à l'échelle nationale.

b) *Une carte prévisionnelle des carences animales possibles d'après les types de sols* peut être basée sur l'étude bibliographique comparée des lieux d'apparition de carences dans le monde et des sols de France. Les documents de base en ce domaine sont fournis par RUSSEL et DUNCAN (1956), UNDERWOOD (1966), la F. A. O. (1961), mais doivent être repensés sous un aspect plus pédologique, et être complétés. Les localisations géographiques des carences et la présentation des sols correspondants se trouvent rarement dans les mêmes publications. L'ensemble des données recueillies [1] permettent de préciser et de compléter les localisations déjà signalées par PEDRO en 1968 à partir de considérations purement géochimiques.

[1] Travail de synthèse réalisé par Mme MICHEL, documentaliste de la Station de Physiopathologie de la Nutrition.

c) *Une carte des carences animales réelles* est indispensable : elle doit être basée sur les résultats d'une enquête entreprise auprès des vétérinaires et des éleveurs. Où celle-ci recueillera des présomptions de carence, des analyses de foins d'abord, des tests thérapeutiques ensuite, viendront les confirmer ou les infirmer. Dans la première phase d'analyse, les dosages sur tissus animaux restent exceptionnels par suite des difficultés de prélèvement et de transport (sang) ou d'interprétation (poils).

### 2. — *Localisation des carences possibles (d'après les types de sols)*

L'apparition de carences, liées le plus souvent aux faibles teneurs des foins de prairies naturelles, est subordonnée, comme on le sait (MITCHELL, 1965, etc.) :

1° A la réserve en oligo-éléments totaux de la roche mère, c'est-à-dire au type de roche.

2° Au type et au degré d'altération subie par cette roche au cours de la pédogenèse, processus qui aboutit à la libération des oligo-éléments à partir des minéraux primaires, puis à leur blocage plus ou moins poussé au sein des matériaux de néoformation, argiles, hydroxydes de fer et d'aluminium, chélates, etc. Ce blocage peut intervenir en profondeur après lessivage des horizons superficiels (d'où le fort appauvrissement des podzols).

3° Aux conditions actuelles de pH et de potentiel redox du sol : ainsi le manganèse est plus mobile en milieu acide qu'alcalin, le molybdène a un comportement opposé. Les deux sont solubilisés en milieu réducteur, mais bloqués dans les concrétions ferromanganiques des pseudogleys. L'activité microbienne intervient en outre pour libérer ou stocker les éléments constitutifs de la matière vivante.

Ces quelques données de base permettent de tenter d'établir une carte prévisionnelle des carences en France :

a) *Les carences primaires en cuivre et cobalt* sont souvent liées : elles peuvent être rencontrées (BELLANGER, LAMAND et PÉRIGAUD, 1970) :

— soit sur des roches-mères pauvres en cuivre et cobalt,

— soit sur des roches-mères riches mais ayant subi des phénomènes d'altération poussée.

Ces carences peuvent se situer en France en de multiples conditions :

α) *Sur les roches éruptives acides*, du type granite ou rhyolithe, roches pauvres en cuivre et cobalt (1 à 20 p.p.m. Cu total ; 0,5 à 8 p.p.m. Co total) :

— Massif armoricain jusqu'à la Vendée et la Haute Normandie,

— Massif central (Marche, Millevaches, Combrailles, Margeride, Madeleine, Livradois, Forez, Lyonnais, Morvan, Rouergue, Ségala et Montagne Noire),

— Vosges (partie sud-est),

— Alpes (Pelvoux, Mercantour).

L'intensité de la carence est fonction de deux facteurs :

— la composition de la roche : les leucogranites sont moins bien pourvus que les granites à biotite (COPPENET, 1968) ; ainsi le plateau de Millevaches est vraisemblablement plus carencé que la plus grande partie du Forez [1] ;

— l'intensité du lessivage, maximum à l'intérieur des terres dans le Finistère

[1] De données très récentes (DAUTRIA, 1970), il ressort que la compositon chimique d'un granite n'est pas forcément liée à sa composition minéralogique : la distinction entre leucogranites et granites à biotite n'est pas à conserver.

ou aux altitudes les plus élevées du Massif central. Ces granites ont donné naissance parfois à des podzols et des sols podzoliques, le plus souvent à des sols lessivés.

β) *Sur des roches volcaniques basiques altérées* :

— soit des cendres volcaniques, particulièrement altérables (PEDRO, 1968),

— soit des sols basaltiques très anciens sous altitude élevée : monts Dore, monts Dômes, Cézallier, peut-être Aubrac.

γ) *Sur des sédiments détritiques acides* qui ont donné naissance à des podzols, des sols podzoliques ou des sols très lessivés :

— *Sédiments primaires :*

— grès quartzeux du Cambrien, Silurien, Dévonien en Bretagne, en Normandie, dans le Sud du Massif central (Montagne Noire), dans les Ardennes ;

— grès rouges permiens du Bassin de Brive, du Ségala, du Camarès (Aveyron).

— *Sédiments secondaires :*

— grès bigarrés du Trias dans les Vosges (les mêmes sols sont signalés comme très carencés dans la Forêt Noire) ; les affleurements du Morvan, des Alpes et des Pyrénées sont probablement carencés ;

— sables ferrugineux du Cénomanien (Crétacé) aux confins du Perche et du Maine, du Berry et de la Touraine, etc.

— *Sédiments tertiaires :*

— éocènes : sables du Soissonnais, dépôts sidérolithiques de la bordure ouest et nord-ouest du Massif central (Périgord, Poitou, Montmorillonnais et Brenne) ;

— oligocènes : sables de Fontainebleau ;

— miocènes : sables de Sologne et de l'Orléanais ;

— mioplicènes : sables de Sologne bourbonnaise, sables fauves de Chalosse.

— *Sédiments quaternaires :*

— podzols des Landes.

δ) *Sur des sédiments calcaires.*

La loi de répartition des oligo-éléments dans les sédiments calcaires est moins simple que dans les roches éruptives. Des études locales sont nécessaires pour confirmer leur comportement, mais, dans l'ensemble, les sols calcaires où se rencontrent des carences Cu-Co, doublées de carences en Mn, sont les rendzines et les sols humides carbonatés formés sur calcaires gréseux carbonifères, sur calcaire oolithique jurassique, sur craies du Crétacé, sur sables coquilliers tertiaires, ceci surtout lorsque le sol est peu épais. Les sols rouges méditerranéens semblent également carencés.

Les carences Cu-Co-Mn sont donc possibles dans les Causses, le Périgord et le Quercy, les Champagnes (Est, Bassin parisien, Bourgogne, Berry, Charentes), sur les faluns (Tertiaire) d'Anjou et de Touraine, etc., en altitude dans le Jura et les Alpes calcaires, peut-être dans la vallée du Rhône (Crau) et le Languedoc (sols rouges).

ε) *Sur des sédiments détritiques calcaires plus ou moins décarbonatés,* notamment :

— les cônes d'alluvions fluvioglaciaires des Pyrénées (Chalosse, Lannemezan), du Jura et des Alpes (Dombes, Bas Dauphiné) ; (les carences sont signalées dans

de telles situations non seulement en Écosse et en Suède, mais aussi en Autriche) ;

— les argiles à silex issues du Crétacé supérieur que l'on rencontre notamment en Normandie, dans le nord du Berry, etc.

b) *Les carences en cuivre induites par des excès de molybdène.*

Les excès de molybdène peuvent se rencontrer :

— soit sur des roches riches en molybdène,

— soit sur des roches moins bien pourvues, mais dont les conditions de pH et (ou) d'humidité sont favorables à la solubilisation de cet élément.

Ces excès sont normalement situés en France :

α) *Sur les sols issus de roches riches en molybdène :* tels les schistes carbonifères (signalés comme tels en Angleterre) que l'on rencontre notamment dans le Morvan, le Bassin de Roanne, etc.

β) *Sur des sols récents issus de roches assez riches en molybdène,* tels les cônes d'alluvions granitiques récentes (signalés aux U. S. A.), comme certaines vallées des Alpes, des Pyrénées-Orientales, des Vosges, etc.

γ) *Sur les sols hydromorphes neutres ou légèrement calcaires :* les marnes infraliasiques de l'auréole du Bassin parisien depuis les Ardennes, la Lorraine, par le Morvan et jusqu'au Poitou et quelques affleurements en Normandie et dans certaines vallées des Alpes (Isère, Drac et Ubaye) ;

— les sols d'origine glaciaire, tels ceux rencontrés dans la Bresse, la Chalosse, le Lannemezan.

δ) *Sur certains sols hydromorphes acides* à l'exception probable des anciens pseudogleys, tels certains sols de Brenne, de Sologne bourbonnaise, de la vallée de la Saône et du Doubs, des sols tourbeux de l'Aisne, de l'Oise et des tourbières hautes du Massif central.

ε) *Enfin sur les sédiments marins récents, les sols noirs de marais* où au mauvais drainage et à l'alcalinité, se superpose souvent la présence de sulfates : les Marais poitevin, breton, du Cotentin, la côte maritime de Flandre et de Picardie, la Camargue.

c) *Autres carences.*

La liaison existant entre l'apparition des autres carences et les types de sols correspondants n'est pas toujours bien connue :

— les carences en *sélénium,* provoquées ou par la pauvreté de la roche mère ou par la très forte adsorption des sélénites sur les argiles et les hydroxydes de fer et d'aluminium, se situeraient surtout sous des pluviométries élevées (Gardiner et Gorman, 1963), sur les granites et les roches métamorphiques très arénacées, parfois sur Volcanique tertiaire ou cendres volcaniques récentes, ainsi que sur des grès primaires (dévoniens) ou des dépôts sableux podzolisés (Kubota *et al.*, 1967) ; ce sont pratiquement les mêmes localisations que celles de la carence en cuivre ou en cobalt (Gardiner, 1966) ;

— les carences en *manganèse* ou *zinc* semblent liées surtout au pH et au drainage du sol et ne peuvent pas être régionalisées de façon systématique ;

— les carences en *iode* ne sont pas liées au sol.

### 3. — *Localisation des carences réelles (d'après l'état de santé des animaux)*

*Les carences en sélénium* sévissent en France dans les départements du Centre entre le Loir-et-Cher et l'Aveyron d'une part, la Saône-et-Loire et la Haute-Vienne d'autre part (LAMAND, 1966). Elles semblent actuellement en extension.

*Les autres carences* font l'objet d'études encore trop récentes pour que les résultats obtenus puissent être précis et définitifs.

Deux enquêtes, l'une (terminée) auprès des vétérinaires praticiens, l'autre (en cours) auprès des éleveurs, permettent de localiser des présomptions de carence ; elles seront complétées par des analyses de foins et les tests thérapeutiques nécessaires à la confirmation de la carence.

a) *L'enquête vétérinaire* est en cours d'exploitation statistique. Son dépouillement manuel sommaire donne les résultats partiels suivants :

1° des profils de carence primaires en *cuivre* et *cobalt* se retrouvent sur le bétail dans les régions où les carences en cuivre sur céréales et la pauvreté en cobalt des sols ont été démontrées (COPPENET, 1968) : c'est-à-dire en Bretagne et dans le Maine (Morbihan, Finistère, Côtes-du-Nord, Ille-et-Vilaine, Orne, Mayenne et Sarthe) ; les carences semblent s'étendre dans le Maine-et-Loire et en Loire-Atlantique, sur les leucogranites et les sédiments primaires les plus anciens, qui ont donné naissance à des sols podzoliques ou des sols très lessivés ;

2° des carences en cuivre induites par des *excès de molybdène* liées ou non à la carence en cobalt sont décrites :

- sur certains granites et sédiments primaires très anciens de la Manche et du Rhône,
- sur les argiles à silex de l'Eure,
- sur le Jurassique supérieur et le Cénomanien-Turonien des Charentes, de la Sarthe, du Maine-et-Loire,
- sur l'Infralias et le Trias des Vosges.

Toutes ces localisations récentes sont conformes aux données qui nous viennent de l'étranger. Elles ne sont pas limitatives, car :

α) Les réponses à notre questionnaire ne sont pas très nombreuses (300 sur 3 000) et certaines régions ne sont pas représentées ;

β) n'ont été considérés comme « probablement carencés » que les profils assez nets d'au moins deux ou trois symptômes alors que, nous l'avons vu, un seul peut être extériorisé.

A l'inverse, le regroupement de tous les sols signalés plus haut ne permet pas de détecter une carence, ce qui confirme la nécessité d'études suffisamment localisées.

b) *L'enquête éleveur* entreprise avec l'aide des Services du Développement n'est pas encore terminée, seuls quelques départements (une dizaine) apportent jusqu'à présent leur collaboration effective dans ce lourd travail. Certains ont déjà dépassé le stade de l'enquête et nous ont permis de confirmer la carence décelée comme probable par des analyses de fourrages, de sang, de poils ; quelques tests thérapeutiques sont en cours.

Cette étude indique déjà que des carences animales existent, de façon presque certaine, sur certains sols :

— des carences en cuivre ont été décelées dans le Puy-de-Dôme, en Haute-Combrailles, sur des sols granitiques qui ne sont pas issus de leucogranites mais sont soumis à de très fortes pluviométries (1 200 mm). Elles sont très probables aussi sur certains basaltes anciens sous altitude élevée ;

— des symptômes de carence sont également signalés dans la Creuse, la Haute-Vienne, le Cantal, le Morvan, etc., sur les granites, les migmatites, les basaltes, qui ont donné partout naissance à des sols fortement lessivés ;

— les grès bigarrés du Muschelkalk inférieur semblent reproduire, dans les Vosges, les mêmes carences que dans la Forêt Noire ;

— on retrouve à Fayl-Billot, en bordure est du plateau de Langres, les hypocuprémies induites par des excès de molybdène signalées dès 1962 dans le Bassigny par KERGUÉLEN ; elles s'y compliquent parce que, dans ce canton, les argiles infraliasiques sont en bordure des argiles gypseuses du Keuper et des calcaires marneux du Muschelkalk et des problèmes de manganèse semblent se superposer au précédent ;

— les éleveurs sur sédiments détritiques de Sologne bourbonnaise et sur boulbènes dans le Tarn-et-Garonne signalent aussi des symptômes de carence ;

— enfin les sédiments calcaires, jurassiques, crétacés ou tertiaires (Ardennes, Normandie, Agenais), les argiles du Cénomanien (Orne), les argiles à silex de Normandie ne semblent pas indemnes de carence.

### 4. — *Résumé*

L'étude des sols de France laisse supposer des carences dans de nombreuses régions. Des analyses encore sporadiques confirment qu'elles existent, au moins dans certaines régions où les sols sont présumés carencés, la carence en cuivre paraissant la plus répandue.

Pourquoi, dans ces conditions, entend-on peu parler des carences sur l'animal, en dehors de la myopathie des veaux ? Trois explications sont possibles :

— les sols signalés comme les plus carencés dans le monde (podzols, tourbières, alluvions glaciaires) sont peu représentés en France. Là où ils le sont, l'élevage est inexistant ou très extensif ;

— dans ces conditions, nous avons surtout des « subcarences », cas le moins net, le plus difficile à diagnostiquer, et ceci, d'autant plus que, dans les très bons élevages, les éleveurs, prévenus, complémentent souvent l'alimentation de leurs animaux (cas de la Bretagne) ;

— l'examen de l'énumération des « sols à carence » rend évidente leur extrême dispersion et souvent leur faible extension géographique ; des problèmes même sérieux peuvent ne pas attirer l'attention lorsqu'ils sont très localisés. De plus, des « contaminations » par des affleurements d'origine différente sont vraisemblables dans un pays où la géologie est complexe. Les « contaminations » peuvent aussi provenir des techniques culturales ou des techniques d'élevage.

Le problème est infiniment moins simple en France que dans les vastes plaines de Russie ou d'Australie.

En France, les élevages d'un niveau de production élevé sont les plus touchés. La myopathie ne sévit que là où le croît journalier dépasse 1 000 g/jour (LAMAND,

1966, résultats non publiés). Avec une ration condensée à base de céréales (pauvres en cuivre), la croissance de jeunes bouvillons est tombée à 200 g/jour, sans qu'aucun symptôme apparaisse ; la complémentation en cuivre de la moitié des animaux a permis à ces derniers de remonter à 1 200 g/jour (LAMAND, BELLANGER et GEAY, 1969).

Si la liaison entre le sol et l'animal reste évidente en élevage traditionnel, elle devient de plus en plus lâche au fur et à mesure que l'intensification animale est accentuée. Une meilleure connaissance des facteurs intervenant sur les teneurs en oligo-éléments des aliments distribués et notamment des fourrages devient impérative.

## III. — LES OLIGO-ÉLÉMENTS DANS LES FOURRAGES

### A. — LES ESPÈCES PURES

#### a) *Sensibilité à la carence*

Les graminées fourragères sont beaucoup moins sensibles à la carence en cuivre que les céréales et n'extériorisent qu'exceptionnellement quelques symptômes de blanchiement ; certaines légumineuses se contentent de disparaître (COPPENET et CALVEZ, 1956). Mais, d'après KERGUÉLEN (1960), les rendements en fourrage vert sont rarement affaiblis par l'insuffisance de cuivre en France. En fait des essais systématiques mériteraient d'être entrepris : sur les podzols ou les tourbes de Russie et d'Allemagne, les récoltes sont substantiellement augmentées par des apports de cuivre.

#### b) *Variations de composition*

La bibliographie étrangère et quelques travaux de KERGUÉLEN (1960 et 1962) nous révèlent que la composition en oligo-éléments des fourrages est sous la dépendance étroite de différents facteurs, les uns liés aux conditions de milieu, les autres à la plante.

α) *Facteurs liés à l'environnement.*

*Le sol.*

L'existence d'aires de carence démontre la relation étroite qui peut exister entre le sol et la composition en oligo-éléments des fourrages. Toutefois, en dehors d'une recherche de corrélations entre la teneur des sols en oligo-éléments « assimilables » et la composition ou le rendement de certaines plantes, il n'existe que peu d'études comparatives en ce domaine : ANKE (1961), ANKE *et al.* (1962) ont montré que les luzernes contiennent moins de cuivre sur les granites que sur les grès bigarrés du Trias, sur schistes primaires que sur calcaires du Muschelkalk, etc. Les pailles sur sables glaciaires sont beaucoup plus pauvres qu'ailleurs (PIZER *et al.*, 1966). Les sols lessivés mal drainés donnent des fourrages plus riches en molybdène que les sols à pseudogleys (KUBOTA *et al.*, 1961 ; ROBINSON et EDGINTON, 1954, etc.). Les sols granitiques de Bretagne donnent des foins qui contiennent 0,155 p.p.m. Co et 4,14 p.p.m. Cu, tandis que, sur schistes, les teneurs s'élèvent respectivement à 0,20 p.p.m. Co et 4,61 p.p.m. Cu (COPPENET, 1968).

*Les conditions climatiques.*

Les teneurs en oligo-éléments des fourrages peuvent varier considérablement d'une année à l'autre ; une sécheresse prolongée de printemps qui limite la croissance, puis une période de pluie qui retarde le développement des plantes, donnent moins de matière sèche mais des fourrages plus riches qu'en année normale (GAWECKI *et al.*, 1968). Les pluies du mois de mai sont signalées comme ayant une influence prépondérante sur la composition de la récolte.

Ces variations ne sont obligatoirement identiques pour une même plante entre parcelles voisines (LUNDBLAD *et al.*, 1949), les mêmes conditions météorologiques agissant aussi sur la plante en fonction du comportement spécifique du sol.

β) *Facteurs liés à la plante* (1).

1° *Espèce.*

*Cuivre :* les « mauvaises herbes » (pissenlit, plantain, bouton d'or, etc.) sont les espèces les plus riches (11 à 16 p.p.m. Cu), les graminées sont les plus pauvres (5-7 p.p.m.), les légumineuses sont intermédiaires (8-10 p.p.m.).

En sol carencé en cuivre, les légumineuses, plus sensibles à la carence que les graminées, peuvent contenir moins de cuivre que ces dernières ; leur gamme de variation est donc très étendue (1,7 à 12 p.p.m. en Écosse).

Parmi les graminées, la fléole et la fétuque élevée — deux espèces qui s'adaptent bien aux conditions humides — semblent se classer parmi les plus pauvres. Le ray-grass est moyen, le pâturin et le brome sont les plus riches.

Certaines espèces accumulent le cuivre au point d'être dangereuses pour les animaux (gypsophiles, certaines mousses, etc.) : ce sont des indicatrices de gîtes métallifères.

*Molybdène :* les légumineuses sont aussi dans l'ensemble mieux pourvues que les graminées, les trèfles mieux que les luzernes... La flore spécifique des prairies humides (houlque laineuse, agrostis, crételle des prés) est très riche, ce qui aggrave sur l'animal la carence en cuivre due précisément à la faible teneur en cuivre des graminées résistantes à l'hydromorphie. En sol riche en molybdène assimilable, les teneurs des légumineuses peuvent atteindre 200 p.p.m. Mo, celles des graminées 20 p.p.m.

*Manganèse :* à la différence des oligo-éléments précédents, il est mieux absorbé par les graminées que par les légumineuses, la luzerne est très pauvre. Parmi les graminées, c'est le dactyle qui est le mieux pourvu.

*Sélénium :* les fléoles et le lotier sont plus pauvres en sélénium que les bromes, les dactyles et les fétuques. Quant aux autres légumineuses, elles se situent au voisinage des dactyles sur sols normaux ou carencés. En sols très enrichis, par contre, elles accumulent le sélénium, jusqu'à 75 p.p.m. Certaines espèces, comme l'Astragale, peuvent atteindre 4 000 p.p.m.

2° *Partie de la plante.*

Les feuilles sont plus riches que les tiges ; par exemple, un Ray-grass d'Italie contient 4,3 p.p.m. Cu et 0,4 p.p.m. Mo dans ses feuilles contre 1,8 et 0,1 dans

(1) Les données fournies dans ce paragraphe sont tirées des synthèses de BARSHAD (1948), WILLIAMS (1959), KIRCHGESSNER *et al.* (1960), KERGUÉLEN (1960-1962), FLEMING (1963-1965), FLEMING et MURPHY (1968).

les tiges. Les feuilles de luzerne contiennent 4 fois plus de molybdène que les tiges. En général, les parties jeunes (des feuilles et des tiges) sont mieux pourvues que les parties âgées. Cependant, si les éléments disponibles du sol sont insuffisants, la translocation des oligo-éléments des vieilles feuilles vers les jeunes est alors très faible ; la paille des céréales est normalement plus pauvre en cuivre que le grain, mais, en milieu carencé, l'inverse est observé et il faut une carence très aiguë pour que la teneur de la paille tombe elle-même à moins de 2 p.p.m. (PIZER *et al.*, 1965).

3° *Stade végétatif.*

*Cuivre.*

Premier cycle.

*Les graminées* subissent une baisse importante de leur teneur en cuivre au cours de leur premier cycle ; la baisse est d'abord rapide, par exemple de 10,0 à 5,7 p.p.m. entre le 22 avril et le 5 mai sur le dactyle, de 44,0 à 8,0 entre les mêmes dates sur la fétuque élevée. Cette chute, plus lente ensuite, reste continue jusqu'à la floraison (KERGUÉLEN, 1960). Les données étrangères plus récentes indiquent la même évolution ; l'appauvrissement continue au cours de la maturation des semences et au-delà (5,3 le 20-6 et 3,9 le 17-7, d'après KIRCHGESSNER, 1960).

*Les légumineuses* subissent également une baisse de leur teneur en cuivre, mais celle-ci est irrégulière, peu importante, et dépasse peu le stade floraison ; les données étrangères sur ce sujet sont d'ailleurs assez contradictoires.

Autres cycles.

Les teneurs sont maxima aux stades feuillus ; si les seconds cycles d'été des graminées (dactyle et fétuque) sont pauvres, les troisièmes cycles d'automne sont, par contre, les plus riches, du même niveau que les premières pousses du printemps (KERGUÉLEN, 1960). Les conditions climatiques semblent, toutefois, introduire de profondes variations d'une année à l'autre ; les types alternatifs n'ont pas fait l'objet d'études particulières.

Les légumineuses semblent avoir là aussi un comportement plus irrégulier.

*Sélénium.*

La teneur en sélénium, contrairement au cuivre, augmente avec l'âge de la plante dans les sols sélénifères étrangers (11 à 22 p.p.m. entre début juin et fin juillet pour un ray-grass).

*Autres oligo-éléments.*

Les autres oligo-éléments ont été moins étudiés, ils semblent suivre les mêmes lois que le cuivre, de façon plus irrégulière. Les plantes sont très plastiques vis-à-vis du molybdène, du manganèse et du sélénium et les conditions d'environnement peuvent avoir plus d'importance que le stade végétatif lui-même, d'où la très grande dispersion des données. De façon générale, les taux de manganèse et de molybdène sont plus élevés en automne qu'en été (cette donnée est confirmée pour le manganèse dans nos tableaux 7 et 8).

c) *Conséquences sur l'alimentation animale*

— Les fourrages récoltés tardivement en premier cycle seront pauvres en cuivre, et d'autant plus pauvres qu'ils contiennent moins de légumineuses.

— Des fourrages récoltés tardivement, séchés dans de mauvaises conditions, sont encore plus pauvres ; le fanage fait perdre les organes jeunes, les mieux pourvus. Dans le séchage au sol, les pertes de cuivre et d'iode sont supérieures à celles de matière organique (KIRCHGESSNER, 1965). L'ensilage semble le meilleur mode de conservation des oligo-éléments, surtout pour les légumineuses (GAWECKI *et al.*, 1968) ; encore faudrait-il comparer les modes d'ensilage.

— L'équilibre Cu/Mo, si fondamental pour l'animal, reste à étudier, notamment au niveau des repousses automnales ;

— l'emploi des engrais molybdiques et séléniés est à proscrire, car les risques de toxicité sont importants pour l'animal ;

— l'intensification fourragère peut contribuer largement, par le choix d'espèces très pauvres, à accentuer les carences animales.

## B. — LES PRAIRIES

### a) *Lois générales*

Les phénomènes de compétition, en modifiant le rythme de croissance des espèces, se répercutent sur leurs compositions. Ainsi, le brome cultivé seul, reste beaucoup plus court que mélangé à la luzerne et apparaît, au stade laiteux du grain, moins bien pourvu en cuivre (LOPER et SMITH, 1961) ; mais les données restent peu nombreuses en ce domaine.

Dans les prairies naturelles, les variations de composition floristique sont également très importantes au cours de la saison, mais sont rarement précisées. L'étude des prairies reste difficile. Dans celles qui sont à base de graminées, on observe des baisses importantes des teneurs en cuivre au cours de la première pousse et les regains sont toujours plus riches.

### b) *Les foins en France*

En France, les oligo-éléments dans les prairies naturelles ou temporaires ont encore été peu étudiées.

#### α) *Teneurs en cuivre des premières coupes.*

COPPENET, en Bretagne, indique des teneurs moyennes de 4,15 p.p.m. Cu (foins à base de Ray-grass d'Italie) sur les sols granitiques carencés et 4,61 sur les sols schisteux suffisamment pourvus pour les céréales (COPPENET, 1968).

HÉDIN et KERGUÉLEN ont fait quelques prospections systématiques en Lozère (HÉDIN et KERGUÉLEN, 1962-63), dans le Capcir et la Cerdagne en Pyrénées-Orientales (mêmes auteurs, 1964-65), en Aubrac (résultats 1965 non publiés) et dans le Champsaur (*d°*, 1966).

En Aubrac, plus de 50 p. 100 des foins analysés (60 échantillons) contiennent moins de 5 p.p.m. de cuivre : ils correspondent aussi bien à des granites et des grès permiens qu'à des basaltes et même des calcaires. Les autres, dont aucun ne dépasse 8,7 p.p.m., ont les mêmes origines.

TABLEAU 3

*Teneurs en Cuivre et Manganèse de quelques foins français* (1968-1969)

| Département | Région | Altitude | Géologie | Cu (p.p.m. M. S.) | Mn (p.p.m. M. S.) |
|---|---|---|---|---|---|
| Puy-de-Dôme | *Plateau volcanique* (Laqueuille-Orcival) | 900-1 000 m | Basaltes et cendres | 2,4 à 5,7 | 122 à 236 |
| | *Région Theix* | 800 m | Basaltes et granites | 4,1 à 4,3 | 65 à 141 |
| | *Combrailles* | | Granites + migmatite | 3,9 à 6,1 | |
| | Condat-Herment | 800 m | Micaschistes | 4,0 à 5,4 | |
| | Montaigut | 700 m | Granites + migmatite | 6,3 | 46 |
| | Saint-Éloy-les-Mines | 600 m | Gneiss + schistes | 4,9 | 82 |
| Cantal | *Cézallier* | 1 200 m | Basaltes | 4,0-6,0 | 216 à 472 |
| | Marcenat | 1 000 m | Basaltes + migmatite | 4,3-6,0 | 132 à 166 |
| | Saint-Bonnet | 1 100 m | — + — | 4,9-6,1 | |
| | *Massif du Cantal* | 1 300 m | Basaltes + cendres | 3,4 à 4,6 | |
| Allier | *Bocage* | 300 m | Trias + Infralias | 4,7 | 144-158 |
| | *Sologne bourbonnaise* | 200 m | Détritique tertiaire | 4,4-6,2 | 85-366 |
| Yonne | *Morvan* (La-Pierre-qui-Vire) | 500 m | Leucogranites | 3,8 | 114 |
| Nièvre | *Morvan* | 450 m | Jurassique + Infralias | 3,0 à 5,2 | 40 à 162 |
| | *Nivernais* | 250 m | Jurassique | 5,0 à 5,4 | 36-86 |
| Haute-Savoie | *Bas-Genevois* | 500 m | Molasses quaternaires | 3,0-5,0 | 87-123 |
| Savoie | *Cluse de Chambéry* | ? | Miocène | 5,3 | 116 |
| | *Vallée du Rhône* | 220 m | Alluvions | 4,0-5,1 | 49-88 |
| Ardennes | *Haute-Argonne* | 250 m | Jurassique et Crétacé | 4,0 | 44 |
| Haute-Marne | *Plateau de Langres* | 300 m | Muschelkalk | 3,7 à 7,1 | 24 à 300 |
| | *Amance* | | Infralias | | |
| Seine-Maritime | *Pays de Caux* | 150-200 m | Calcaires crétacés + argiles à silex | | |
| | Foin de 1967 : | | | 3,0 à 5,5 | 46 à 166 |
| | Foin de 1968 : | | | 4,6 à 9,9 | 48 à 150 |
| Orne | *Perche* | 150 m | Cénomanien | 3,6 à 4,0 | 30-152 |
| Lot-et-Garonne | *Agenais* | 100-150 m | Calcaires miocènes | 4,0-4,8 | 20-316 |

Sur les Causses (sols calcaires), la moyenne des teneurs en cuivre est un peu plus élevée, voisine de 8,0 p.p.m. Dans le Champsaur (Hautes-Alpes), les foins sont, à l'opposé, exceptionnellement pauvres (jusqu'à 1,8 p.p.m.).

A l'extérieur de l'I. N. R. A., quelques organismes ont fait doser le cuivre dans leurs foins. Ainsi :

— en Haute-Saône (Trias, Jurassique, quelques dépôts tertiaires), les teneurs se situent entre 3,8 et 7,1 p.p.m., sans relation avec le type de sol ;

— en Charente-Maritime, les prairies temporaires à base de luzerne ne contiennent en moyenne que 4,3 p.p.m. sur Terres de Groie et 4,2 sur les argiles à silex (différence non significative).

Dans le cadre de notre enquête actuelle sur les carences animales, nos premiers résultats d'analyses de foin sont consignés dans le tableau 3. Les taux de cuivre sont relativement bas, car il s'agit de foins à base de graminées, récoltés tardivement, souvent dans de mauvaises conditions.

Les prairies temporaires, lorsqu'elles contiennent au moins 20 p. 100 de légumineuses, sont un peu plus riches que les prairies naturelles, quoique moins que les luzernes (tabl. 4).

TABLEAU 4

*Teneurs comparées en Cuivre de prairies naturelles et de prairies temporaires sur les mêmes exploitations*

Cu p.p.m. M. S.

| Provenance | Foins Prairie naturelle | Foins Prairie temporaire (mixte) | Foins Luzerne |
|---|---|---|---|
| Lot-et-Garonne (Agenais) | 4,8 | 5,6 | 6,8 |
| | 4,0 | 6,6 | |
| | 4,0 | | 6,8 |
| | | 5,4 | 9,0 |
| Puy-de-Dôme (Combrailles) | 4,3 | 8,9 | |
| | 5,2 | 6,3 | |
| Ardennes (Argonne) | 4,0 | | 7,2 |
| Orne | 3,6 | | 4,0 |
| Hautes-Alpes (Champsaur) | 1,8 | | 4,6 |
| Haute-Saône (Trias) | 4,8 à 6,7 | 4 à 9,0 | |

Les différences de composition floristique expliquent ces chiffres.

Remarquons aussi que les prélèvements de deux années successives en Normandie sur les mêmes exploitations (tabl. 3), montrent des différences très nettes de composition d'une année à l'autre.

β) *Teneurs en cuivre des autres coupes.*

Dans les échantillons que nous avons analysés, les secondes coupes et surtout les regains apparaissent toujours plus riches que les foins de première coupe (tabl. 5). Ces résultats confirment les données étrangères.

γ) *Teneurs en manganèse.*

Les teneurs en manganèse sont extrêmement variables (tabl. 3), surtout dans les régions calcaires où elles sont susceptibles d'être multipliées par un coefficient supérieur à 10 lorsque l'on passe, dans une même exploitation, d'un sol sain à un sol humide. En altitude, où les sols sont riches en matière organique, et acides, les taux de manganèse restent toujours relativement élevés.

δ) *Teneurs en sélénium.*

Les teneurs en sélénium des foins analysés sont consignées dans le tableau 6 (LAMAND, 1968-1969, résultats non publiés).

c) *Conséquences sur l'alimentation animale*

α) *Généralités.*

Le tableau 2 met en comparaison, pour chaque oligo-élément, les seuils de carence et de toxicité à ne pas dépasser dans la ration distribuée aux animaux et les teneurs extrêmes habituellement rencontrées dans les foins.

L'examen de ce tableau montre que, lorsque la ration est constituée surtout de foin :

— les carences en fer ne sont pas à craindre pour les animaux adultes, les fourrages en étant toujours très largement pourvus ;

— les carences et les toxicités en sélénium peuvent se rencontrer ;

— les carences en cuivre peuvent être très importantes, et ceci d'autant plus que le taux de molybdène est plus élevé ; en Allemagne, en Écosse, 70 à 90 p. 100 des foins sont considérés comme carencés (KIRCHGESSNER, 1965 ; HEMINGWAY *et al.*, 1968) ;

— les toxicités molybdiques, les carences en manganèse, les carences en cobalt sont également possibles.

Par ailleurs, il convient de signaler l'antagonisme Cu-Ca qui existe au niveau de l'animal pour de faibles variations du calcium ingéré (KIRCHGESSNER, 1965). L'augmentation du calcium au cours de la croissance du végétal (FLEMING et MURPHY, 1968) entre dans les limites susceptibles de modifier l'utilisation du cuivre par l'animal : l'ingestion de fourrages récoltés tardivement peut donc aggraver la carence en cuivre.

β) *En France.*

— *Pour le sélénium,* les teneurs très faibles des foins, entre 0,01 et 0,04 p.p.m., correspondent aux élevages où la myopathie est importante. Les toxicités ne sont pas connues en France ;

— *en cuivre,* la plupart des teneurs se situent en dessous ou au voisinage du seuil de carence reconnu pour la satisfaction des besoins animaux, la limite restant mal précisée en l'absence de déterminations de molybdène.

Il convient toutefois de remarquer que la plupart des foins analysés proviennent de régions où des difficultés d'élevage signalées sont attribuables apparemment à des carences en cuivre. Des teneurs extrêmement basses (3 p.p.m.) se rencontrent sur basaltes, granites et sur certains sables.

TABLEAU 5

*Teneurs comparées en Cuivre des foins de différentes coupes*

(Cu p.p.m. M. S.)

| Provenance | 1re coupe | 2e coupe | Regain (1) |
|---|---|---|---|
| Haute-Savoie | | | |
| (Bas-Genevois) | 3,3 | | 5,3 |
| Charente-Maritime | 3 8 | 4,3 | |
| | 4,2 | 9,9 | |
| Puy-de-Dôme | 5,6 | | 7,0 |
| (Combrailles) | 5,4 | | 8,0 |
| | 4,6 | | 11,8 |
| | 5,6 | | 7,6 |
| | 5,2 | | 8,0 |
| | 4,5 | | 7,0 |
| | 4,3 | 6,7 | |
| (Theix) (2) | 5,4 | 7,8 | 9,0 |

(1) En altitude, le regain est la dernière exploitation (automne), il peut être la deuxième ou la troisième coupe de l'année.

(2) Les échantillons de Theix proviennent de la même prairie, les autres sont des mélanges des premières, secondes et troisièmes coupes de toutes les prairies de l'exploitation.

TABLEAU 6

*Teneurs moyennes en sélénium des foins de différentes régions*

| Département | Région | Teneur en p.p.m. matière sèche |
|---|---|---|
| Creuse | Fursac | 0,022 |
| Aveyron | Rodez | 0,034 |
| Puy-de-Dôme | La Combraille | 0,022 |
| Puy-de-Dôme | Orcival | 0,032 |
| Puy-de-Dôme | Theix | 0,037 |
| Cher | Osmoy | 0,017 |
| Lozère | Moissac | 0,072 |
| Puy-de-Dôme | Laqueuille | 0,024 |
| Puy-de-Dôme | Rochefort-Montagne | 0,049 |
| Seine-et-Marne | Lagny | 0,18 |
| Nièvre | Tamecy | 0,028 |
| Nièvre | Corbigny | 0,019 |
| Cantal | Aurillac | 0,029 |
| Cantal | Maurs | 0,024 |
| Cher | Avord | 0,050 |
| Allier | Varennes-sur-Allier | 0,104 |
| Allier | Saint-Gérand-le-Puy | 0,054 |
| Seine-Maritime | | 0,035 |
| Charente | | 0,043 |
| Haute-Vienne | | 0,041 |
| Dordogne | Jumilhac-le-Grand | 0,052 |
| Lot-et-Garonne | Nérac | 0,042 |
| Lot-et-Garonne | Moncrabeau | 0,038 |

Les mêmes fourrages exploités au stade feuillu sont plus riches que les foins ; COPPENET (1968) cite les moyennes suivantes :

— au stade foin, 4,15 et 4,61 p.p.m. selon les sols ;
— au stade pâture, 5,24 et 5,90 p.p.m. sur les mêmes sols.

Nous avons ici confirmation de l'intérêt de récoltes précoces et de la supériorité de la pâture.

— *Pour le cobalt,* COPPENET (1968) a trouvé que les fourrages au stade foin avaient une teneur supérieure à celle du stade pâture :

— au stade foin, 0,15 et 0,20 p.p.m. selon les sols ;
— au stade pâture, 0,097 et 0,141 p.p.m. sur les mêmes sols.

Cependant, KIRCHGESSNER (1965) ne trouve aucune différence significative selon l'époque de la fenaison. Les modifications de teneur semblent résulter de l'influence du milieu (pluviométrie, mode de fanage...).

Il est probable également qu'un rythme d'exploitation intensif donne, ne serait-ce qu'en modifiant le rapport feuilles-tiges, des fourrages plus riches que les coupes à foin classiques.

Les différences de composition des foins de Normandie de 1967 et 1968 se sont accompagnées d'une modification de l'état des animaux ; les symptômes signalés en 1968 avaient disparu en 1969 ; les seuils de carence admis par la bibliographie étrangère semblent donc se vérifier. Cette fluctuation des teneurs des foins au voisinage du seuil complique considérablement, pour le vétérinaire, le diagnostic de ces carences.

La variabilité des taux de manganèse, à l'échelle d'une même exploitation, peut expliquer que les carences en manganèse sur le bétail paraissent peu importantes.

### C. — PROBLÈMES LIÉS A L'INTENSIFICATION FOURRAGÈRE

L'intensification fourragère est obtenue d'une part par la culture d'espèces sélectionnées hautement productives, d'autre part par des techniques culturales appropriées et notamment une bonne fertilisation.

#### a) *Espèces sélectionnées*

Nous avons vu que les graminées ne sont jamais très riches en cuivre ; certaines, et en particulier les espèces adaptées aux conditions froides et humides comme les fléoles et les fétuques élevées, se situent au voisinage du seuil de carence pour les animaux.

En sol très pauvre, de telles espèces, fortement fertilisées en éléments majeurs, sont très carencées en cuivre ; les fétuques élevées cultivées sur un bas-fond récemment assaini de Haute-Corrèze à 800 m d'altitude contiennent, à la floraison, de 1,2 à 1,8 p.p.m. de cuivre (1). Il est inutile d'insister sur les dangers d'un tel foin si les animaux ne sont pas complémentés par ailleurs.

(1) Échantillons en provenance d'une expérimentation menée par la Station d'Agronomie de Clermont-Ferrand (1968).

b) *Amendements*

Les amendements calciques, en modifiant le pH du sol, peuvent perturber profondément le comportement de certains ions et provoquer :

— des carences en manganèse,
— des toxicités molybdiques.

Les toxicités molybdiques consécutives à des chaulages importants sont connues à l'étranger, notamment en Nouvelle-Zélande.

L'effet est moins net sur le cuivre : il paraît en liaison avec le taux et la forme de matière organique du sol, dont la vitesse de minéralisation est conditionnée en partie par l'apport de chaux. Même dans les sols où le chaulage ne provoque pas une baisse de teneur en cuivre du fourrage, il peut entraîner une diminution du cuivre sanguin et hépatique sur les animaux (ovins) qui pâturent ces parcelles (McPherson et Hemingway, 1968).

Les amendements humiques activent la minéralisation et peuvent, selon leur importance et les autres conditions de milieu, ou favoriser la libération des oligo-éléments constitutifs de la « vieille matière organique », ou les maintenir bloqués dans un « turn-over » microbien actif ; une interférence avec l'aluminium n'est pas impossible.

c) *Fertilisation en éléments majeurs*

α) *Généralités.*

En Irlande où les sols sont carencés, les prairies fertilisées ont des teneurs très basses en cuivre (5 à 2,5 p.p.m. selon la date) (Fleming et Murphy, 1968).

En Écosse, l'azote est bénéfique sur certains sols, la teneur moyenne en cuivre passe de 6,6 à 9,5 p.p.m. pour Hemingway (1962), mais il fait baisser les teneurs de 4,7 à 4,4 p.p.m. en sol pauvre (Reith et Mitchell, 1964), et, à la limite, sur des tourbes très carencées, l'azote annule toute récolte (Dekock *et al.*, 1968).

En Allemagne du Nord, les hypocuprémies sont beaucoup plus graves sur les troupeaux pâturant sur les herbages qui ont reçu 200 kg d'azote/ha/an depuis 16 ans que sur ceux où l'azote a été limité à 80 kg (cité par Schutte, 1964). De même, l'accroissement des applications d'engrais azotés peut entraîner une chute de fertilité des vaches (Stables, 1969).

L'acide phosphorique, employé seul, peut avoir un effet dépressif sur les teneurs en cuivre du fourrage (Reith et Mitchell, 1964 ; Beeson *et al.*, 1944). Employé avec l'azote. il augmente les taux de cuivre de 50 p. 100 (Reith et Mitchell, 1964). Il peut augmenter dangereusement les teneurs en molybdène certaines années (Neenan *et al.*, 1956).

Quant aux scories, qui apportent 20 à 200 p.p.m. Cu et 0 à 8,9 p.p.m. Co, elles peuvent, selon les cas, avoir un effet nul ou positif (Farrar, 1968) ; l'action dépressive due à la chaux qu'elles apportent reste à démontrer.

La potasse ne semble pas interférer.

Dans l'ensemble, une bonne fertilisation apparaît donc soit bénéfique, soit défavorable selon qu'il s'agit de sol riche ou de sol pauvre en oligo-éléments. Elle peut en effet, soit exalter la capacité d'absorption de la plante, soit, si les réserves disponibles du sol sont faibles, entraîner la dilution des éléments absorbés dans une masse de matière sèche produite plus grande. De plus, la fertilisation introduit

dans les herbages une modification de la flore qui, si elle tend à faire disparaître les légumineuses (cas des fortes fumures azotées), appauvrit encore plus le fourrage en cuivre.

β) *Résultats français.*

KERGUÉLEN a déjà bien illustré ces données avec les exemples de Normandie déjà cités (1960) ; des Ray-Grass d'Italie intensivement cultivés ne contiennent que 0,7 p.p.m. Cu en sol carencé en cuivre, tandis qu'en « sol normal », ils atteignent, mais ne dépassent pas 5 p.p.m.

Quelques Stations d'Agronomie conduisent des expérimentations fourragères dont les prélèvements seront analysés ultérieurement par nos soins en ce qui concerne les oligo-éléments.

Les quelques premiers résultats sont consignés ci-dessous.

*Fumure azotée.*

— *La Station d'Agronomie de Dijon* a étudié sur dactyle *Floréal* l'influence de la dose et de la forme d'azote. L'expérimentation a été menée à Époisses (sol brun calcaire formé sur alluvions modernes).

Les traitements extrêmes donnent les résultats consignés dans le tableau 7.

TABLEAU 7

*Influence de la fumure azotée sur les teneurs en Cuivre et Manganèse du dactyle et du ray-grass d'Italie*

(Station d'Agronomie, Dijon)
Cu et Mn (p.p.m. M. S.)

| Traitement | 1re coupe 10-5-67 | | 2e coupe 19-6-67 | | 3e coupe 29-9-67 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *Cu* | *Mn* | *Cu* | *Mn* | *Cu* | *Mn* |
| *N = 100* | | | | | | |
| Nitrate de chaux | 5,6 | 110 | 6,0 | 123 | 6,2 | 153 |
| *N = 240* | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| Nitrate de chaux | 6,6 | 86 | 7,0 | 90 | 6,8 | 117 |
| | | ** | | | | ** |
| Nitrate d'ammonium | 6,7 | 106 | 6,8 | 113 | 6,9 | 150 |
| | | ** | | ** | ** | ** |
| Sulfate d'ammonium | 6,7 | 131 | 6,7 | 144 | 6,3 | 271 |

Les ** indiquent que les différences sont hautement significatives entre les 2 chiffres qui les encadrent ;

La dose 240 kg N (nitrate de chaux) enrichit le fourrage en cuivre par rapport à la dose de 100 kg (5,6 à 6,6 p.p.m.). Le sulfate d'ammonium peut être dépressif par rapport aux autres formes d'azote (troisième coupe).

La forme d'azote joue encore davantage sur les teneurs en manganèse ; avec 240 kg N, le nitrate de chaux est dépressif et le sulfate d'ammonium très enrichissant, à toutes les coupes, et particulièrement à la troisième.

Différentes interprétations de ce phénomène peuvent être envisagées, mais

nous devons retenir surtout de ces essais que non seulement la dose, mais également la forme de l'engrais peuvent modifier la composition en oligo-éléments du fourrage.

— *La Station d'Agronomie d'Amiens* dispose également de deux expérimentations azote sur graminées fourragères, Ray-Grass d'Italie sur sol lessivé formé sur limon des plateaux, et Dactyle sur rendzine (tabl. 8). Les deux essais datent de la même année, 1965.

TABLEAU 8

*Influence de la fumure azotée sur les teneurs en Cuivre et Manganèse d'un dactyle Floréal de 3 ans*

(Station d'Agronomie, Amiens)
Cu et Mn (p. p. m. M.S.)

*Dactyle*

| Numéro et date de coupe | Témoin 100 N automne + 0 N après chaque coupe | | 100 N automne + 150 N après chaque coupe | |
|---|---|---|---|---|
| | *Cu* | *Mn* | *Cu* | *Mn* |
| 1re coupe 10-5-65 | 5,4 | 76 | | |
| 2e coupe 24-6-65 | 6,4 | 92 | 8,0 | 72 |
| 3e coupe 11-8-65 | 7,8 | 164 | 6,8 | 112 |

*Ray-grass d'Italie*

| Numéro et date de coupe | *Témoin* N = 0 | | N = 200 + 100 + 100 | |
|---|---|---|---|---|
| | *Cu* | *Mn* | *Cu* | *Mn* |
| 1re coupe 31-5-65 | 3,4 | 32 | 4,8 | 40 |
| 2e coupe 18-7-65 | 3,8 | 34 | 6,0 | 72 |
| 3e coupe 28-8-65 | 4,8 | 76 | 8,2 | 124 |

Les dosages portant sur des prélèvements moyens des répétitions d'un même traitement, l'analyse statistique n'a pas été faite, mais on décèle, pour le cuivre :
— sur le dactyle :

— un effet enrichissant probable (8,0 contre 6,4 p.p.m.) de la dose 150 N par rapport au témoin en seconde coupe ;

— mais un effet dépressif probable en troisième coupe de 2 fois 150 kg d'azote (6,8 contre 7,8 p.p.m.) ;

— le ray-grass d'Italie semble, par contre, substantiellement enrichi en cuivre par les fumures azotées quelle que soit la coupe (8,2 contre 4,8 en troisième coupe).

Vis-à-vis du manganèse, l'azote a plutôt un effet dépressif sur le dactyle et enrichissant sur le ray-grass d'Italie ; les types de sols sont, rappelons-le, différents.

— *La Station d'Agronomie de Clermont-Ferrand.*

Ces essais proviennent de prairies naturelles de montagne situées sur sol volcanique entre 1 100 et 1 450 mètres (tabl. 9).

Bien que l'analyse statistique ne puisse être faite, on observe, dans les trois sites, par rapport au témoin en seconde coupe, la même tendance à l'enrichissement en cuivre par 40 kg d'azote, et à l'appauvrissement par 2 fois 40 kg.

TABLEAU 9

*Influence de l'azote sur la teneur en Cuivre d'une prairie naturelle de montagne*

(Station d'Agronomie, Clermont-Ferrand)
Cu (p.p.m. M. S.)

*Cézallier*

| Numéro et date de coupe | | Bas 1 350 mètres | | | Haut 1 450 mètres | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | N = 0 + 0 | N = 0 + 40 | N = 40 + 40 | N = 0 + 0 | N = 0 + 40 | N = 40 + 40 |
| 1re coupe ..... | 2-8 | 6,0 | 6,0 | 6,0 | | | |
| | 9-8 | | | | 6,0 | 5,2 | 6,2 |
| 2e coupe ..... | 14-10 | 4,0 | 5,2 | 4,2 | | 4,8 | 3,8 |

Premier apport d'Azote fin avril
Second apport d'Azote après première coupe

*Banne d'Ordanche*

| Numéro et date de coupe | | Bas 1 100 mètres | | | Haut 1 250 mètres | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | N = 0 + 0 | N = 0 + 40 | N = 40 + 40 | N = 0 + 0 | N = 0 + 40 | N = 40 + 40 |
| 1re coupe ..... | 22-7 | 6,4 | 6,2 | 6,2 | | | |
| | 25-7 | | | | 5,4 | 4,8 | 5,4 |
| 2e coupe ..... | 11-10 | 7,6 | 8,0 | 7,4 | | | |

*Irrigation.*

L'irrigation, qui se double d'un apport complémentaire d'azote, a pour conséquence la formation d'une quantité supplémentaire importante de matière sèche.

Les résultats d'un essai en provenance de Dijon sont très significatifs dans ce sens (tabl. 10) ; si le témoin et la parcelle irriguée à évapotranspiration potentielle ne se différencient pas en première coupe (pour laquelle l'apport d'eau est encore

faible), la seconde coupe irriguée commence à être plus pauvre en cuivre que le témoin, et la différence s'accentue (8,0 contre 9,7 p.p.m.) dans la dernière coupe d'octobre ; les forts rendements d'été sous irrigation ont considérablement augmenté les exportations de cuivre.

TABLEAU 10

*Influence de l'irrigation sur la teneur en Cuivre d'un dactyle Floréal*

(Station d'Agronomie, Dijon)
Cu (p.p.m. M. S.)

| Numéro et date de coupe | | Témoin | | Irrigué ETP |
|---|---|---|---|---|
| 1re coupe (1) | 11-5-67 | 6,9 | | 6,9 |
| 2e coupe | 20-6-67 | 8,4 | * | 8,0 |
| 3e coupe | 13-7-67 | — | | 10,2 |
| 4e coupe | 16-8-67 | — | | 11,2 |
| 3e ou 5e coupe | 26-10-67 | 9,7 | ** | 8,0 |

(1) Faible apport d'eau sur les parcelles irriguées.
* Résultats significatifs. — ** Résultats hautement significatifs entre témoin et irrigué.

*Conclusion.*

Les quelques premières études entreprises dans ce domaine mettent en évidence que l'intensification fourragère est susceptible de poser des problèmes au niveau de l'alimentation animale à base de fourrages et tout particulièrement en ce qui concerne le cuivre.

Parmi les autres cultures utilisées pour l'alimentation animale, les grains de céréales, les betteraves (feuilles et collets surtout) contiennent aussi très peu de cuivre.

Le cuivre semble donc, dans l'état actuel de nos connaissances, constituer le problème majeur qui doit se poser le plus fréquemment à l'éleveur. C'est la raison pour laquelle des techniques d'enrichissement en cuivre des fourrages demandent à être mises au point.

d) *Fertilisation cuivrique des fourrages*

α) *Généralités.*

La fertilisation cuivrique des sols est bien connue (COPPENET, 1968) ; elle est nécessaire à l'obtention de rendements convenables en grains sur les sols carencés en cuivre.

Pour les prairies, le problème se pose très différemment ; ce n'est pas un seuil de carence végétale qu'il s'agit de vaincre, mais un fourrage enrichi en cuivre qu'il s'agit d'obtenir. Or, les fourrages, qui absorbent facilement le molybdène et le sélénium, sont rebelles à l'enrichissement en cuivre, les graminées plus encore que les

légumineuses. En milieu acide très riche en cuivre, ce métal s'accumule dans les racines au point de pouvoir devenir toxique pour la plante, mais la diffusion vers les parties aériennes, variable avec l'espèce, peut être insignifiante (DROUINEAU et MAZOYER, 1962) ; les plantes prairiales courantes ne peuvent pas, par l'intermédiaire de l'absorption racinaire, avoir leur teneur multipliée par un coefficient supérieur à 2 (SCHMITT *et al.*, 1964).

L'effet d'engrais cuivriques répandus sur le sol est donc limité, mais peut parfois permettre de franchir un seuil de carence. La technique est employée systématiquement en Nouvelle-Zélande, en Australie ; elle donnerait de bons résultats en Irlande, en Hollande, en Allemagne du Nord, mais des résultats moins nets en Écosse. Les doses varient, selon les sols et les auteurs, entre 5 et 50 kg de sulfate de cuivre hydraté, épandus en une fois ou tous les ans pendant plusieurs années.

Les pulvérisations foliaires permettent d'éviter les compétitions sol-plante et de franchir la barrière racinaire. Les risques de brûlure ne sont pas négligeables et il faut employer, ou des solutions diluées de sulfate peu efficaces, ou des sels neutres (oxychlorure) beaucoup plus chers malgré les faibles doses employées (200 g Cu/ha chaque fois) (COPPENET, 1968). L'absence d'effet résiduel sur le sol exige en outre de renouveler les pulvérisations pour chaque coupe.

β) *Résultats de l'essai mené à Theix.*

Un essai d'enrichissement de vieille prairie temporaire à base de graminées a été entrepris à Theix, où ce fourrage est relativement pauvre en cuivre. Le sol est dérivé des granites à biotite fortement contaminés par des projections volcaniques quaternaires, la pluviométrie moyenne à cette altitude atteint environ 1 mètre.

Le protocole est du même type que celui de COPPENET (communication personnelle), et comprend trois traitements :

— témoin,

— cuivre apporté au sol, en couverture avant le démarrage de la végétation (début avril), à la dose de 6 kg Cu/ha sous forme d'oxychlorure (dissous dans 2 000 litres d'eau pour permettre un épandage homogène),

— cuivre apporté en pulvérisation foliaire à la dose de 200 g de cuivre par hectare à chaque pulvérisation, sous forme d'oxychlorure en solution à 0,4 g par litre. Il y a eu 3 pulvérisations, 35, 23 et 18 jours avant chacune des 3 coupes (l'appareil employé est du type utilisé pour les sulfatages d'arbres fruitiers).

Les résultats sont groupés dans le tableau 11 :

— le cuivre au sol permet de faire passer les teneurs en cuivre de :

5,4 à 6,2 p.p.m. en première coupe,
7,8 à 8,2 p.p.m. en seconde coupe,
9,0 à 10,6 p.p.m. en troisième coupe ;

l'enrichissement est plus marqué au début de l'épiaison (5,5 à 7,8 p.p.m. au stade ensilage) ;

— les pulvérisations foliaires sont plus efficaces puisqu'elles permettent d'atteindre des teneurs de 14,8 et 15,8 p.p.m. en troisième coupe. En première coupe, bien que supérieur au « cuivre-sol », l'effet est moins important et moins marqué qu'il ne l'était au stade ensilage. Les pluies, qui entraînent vraisemblablement une fraction du cuivre pulvérisé, compliquent les données du problème.

— le tri des espèces au stade ensilage confirme leur classement habituel : graminées < légumineuses < plantes diverses (surtout pissenlits). Il montre aussi que les légumineuses et les « plantes diverses » s'enrichissent beaucoup plus facilement que les graminées sous l'influence de pulvérisations foliaires. Dans notre essai, elles atteignent dans certaines parcelles le seuil de toxicité pour les moutons.

TABLEAU II

*Résultats d'un essai d'enrichissement en Cuivre sur prairie* (Theix)

Cu (p. p. m. M. S.)

| Date | Stade | Plantes | Témoin | *Cuivre sol* 6 kg Cu/ha avant départ végét. 10-4-69 | *Cuivre feuilles* 200 g Cu/ha par coupe (3 fois) | *Cuivre feuilles* Nbre jours écoulés depuis le dernier apport de cuivre |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 3-6-69 | Contrôle (Stade ensilage) | Graminées | 4,8 | 6,5 | 9,9 | |
| | | | ** | ** ** | ** | |
| | | Légumineuses | 6,7 | 10,1 | 21,7 | |
| | | | ** | ** | ** | 20 |
| | | Divers | 9,1 | 12,8 | 24,7 | |
| | | Mélange | *5,5* ** | *7,8* * | *11,9* | |
| | | | | * | ** | |
| 17-6-69 | 1re coupe-foin | Mélange | 5,4 ** | 6,2 ** | 7,9 | 35 |
| | | | ** | ** | ** | |
| 4-8-69 (+ 7 sem.) | 2e coupe | Mélange | 7,8 | 8,2 ** | 14,8 | 23 |
| | | | ** | ** | | |
| 24-9-69 (+ 7 sem.) | 3e coupe | Mélange | 9,0 * | 10,6 ** | 15,8 | 18 |

* Différences significatives ($P < 5\ \%$) — ** Différences hautement significatives ($P < 1\ \%$) entre les résultats encadrant le signe.

γ) *Conclusion.*

Les résultats de cette première année d'essai sont encourageants : l'apport de cuivre au sol est efficace lorsqu'il s'agit comme ici d'un épandage en couverture sans mélange avec le sol par des façons culturales. L'enrichissement est, certes, peu marqué, mais un nouvel épandage avec l'azote, par exemple, n'apparaît pas économiquement impossible et va être étudié.

La pulvérisation foliaire est en principe à retenir pour les prairies de graminées pures, mais ne doit pas être envisagée pour les herbages mixtes destinés aux moutons. Par ailleurs, bien que séduisante *a priori*, cette technique restera délicate d'application, coûteuse, et nécessiterait une expérimentation complémentaire avec un appareillage de grande culture.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Une teneur insuffisante des fourrages en sélénium provoque, dans les élevages à haute capacité de production, une maladie bien connue en France depuis quelques années, la myopathie des veaux.

Les autres carences, par contre, ne sont pas aussi nettes ; elles ne sont ni généralisées, ni très aiguës et leur diagnostic reste difficile.

Bien qu'elle soit la plus complexe à mettre en évidence, la carence en cuivre, primaire ou induite par un excès de molybdène, associée ou non à une carence en cobalt, semble devoir être assez fréquente ; elle est liée au type de sol et au mode d'exploitation.

Les sols « carencés » correspondent à des roches pauvres en éléments totaux (roches ignées acides, roches détritiques sableuses, certains calcaires, etc.) ou à des roches bien pourvues au départ mais fortement altérées par la pédogenèse. Une enquête auprès des vétérinaires a confirmé l'existence de telles carences en Bretagne (carences Cu-Co), en Normandie (carence Cu par Mo), etc. ; la liste n'est pas limitative, car les vétérinaires mal informés n'ont pas toujours répondu. Une enquête en cours auprès des éleveurs tend à compléter ces localisations. L'établissement d'une « carte des carences » d'après des données pédologiques et des données animales est l'un de nos premiers objectifs ; elle devrait constituer pour le praticien un outil de diagnostic complémentaire et faciliter une prophylaxie systématique régionalisée.

L'intensification de la production animale qui augmente les besoins alimentaires du bétail s'accompagne souvent d'une diminution des teneurs en certains oligo-éléments des fourrages ; l'intensification fourragère peut ainsi contribuer à provoquer des carences.

Dans l'ensemble, les graminées sont pauvres en cuivre ; l'installation de soles de graminées pures n'est donc pas sans danger. Certaines espèces sont plus pauvres que d'autres ; une attention particulière devrait donc être portée aux choix des espèces. Les matériaux existent en France, qui devraient permettre de préciser par quelques analyses systématiques le comportement des variétés inscrites au catalogue.

Un stade d'exploitation suffisamment précoce devrait compenser en partie des teneurs moyennement faibles, mais les courbes d'évolution avec le stade restent à préciser pour la plupart des espèces, de même que l'influence de la date de première exploitation sur les repousses ultérieures.

Par ailleurs, l'augmentation considérable de la production de matière sèche par la fertilisation ou d'autres techniques culturales, telles que l'irrigation, modifie profondément les équilibres biologiques ; l'azote favorise l'absorption des oligo-éléments, mais des apports élevés tendent à diluer les oligo-éléments absorbés, donc à diminuer la qualité minérale du fourrage produit. La dose optima à épandre dépend du type de sol.

L'apparition de manifestations de carences certaines années seulement, révèle l'importance du facteur climatique et confirme la nécessité d'étudier, dans le cadre d'essais de longue durée, l'influence de la vitesse de pousse sur la composition en oligo-éléments du fourrage.

La fertilisation cuivrique des prairies peut être un remède à la pauvreté en cuivre de certains fourrages ; elle peut être intéressante dans la pratique partout où la distribution de compléments minéraux au troupeau pose des problèmes. Il semble, d'après les travaux de COPPENET, que, mélangé au sol avant semis, le sulfate de cuivre ait une efficacité très réduite. Son épandage en couverture sur prairie en place est plus efficace. La pulvérisation foliaire d'un sel de cuivre neutre semble une bonne solution pour les fourrages à base de graminées ; elle reste à mettre au point dans le domaine de l'application pratique et est à proscrire pour les prairies trop complexes, surtout si elles sont destinées au mouton, animal très sensible.

L'étude des carences en oligo-éléments du bétail en France débouche sur la pédologie, l'agronomie et la physiologie des plantes fourragères. Elle constitue un cas particulier, précis et limité, de la chaîne sol-plante-animal dont on a beaucoup parlé. Elle demande une collaboration très étroite entre différentes disciplines.

*Reçu pour publication en juin 1970.*

## SUMMARY

### TRACE ELEMENT DEFICIENCIES OF RUMINANTS IN FRANCE. DIAGNOSIS, PROBLEMS RAISED BY INTENSIVE FODDER-CROP GROWING

Trace element deficiencies of ruminants are not well known in France because they are difficult to diagnose. Their systematic plotting on a map might help the expert to identify them ; for this purpose a study has been undertaken to locate, on French metropolitan territory, types of soils usually deficient abroad. An enquiry is in progress with veterinary surgeons and breeders. The first results of this enquiry, which has juste started, point to the almost certain existence of copper subdeficiencies on light acid soils or soils from highly weathered rocks.

However, the intensive cultivation of fodder-crops deeply alters the soil/plant relationship : the use of bred species, of fertilization, of irrigation, etc. may aggravate natural deficiencies or bring out new ones on animals which have not been supplied in addition with the right amount of mineral sub-stances. This problem may be solved through the use of copper fertilizers on grazing land ; however the amounts have still to be defined and will vary according to the nature of the flora.

## ZUSAMMENFASSUNG

### SPURENELEMENTEKARENZEN BEI WIEDERKÄUERN IN FRANKREICH. IHRE DIAGNOSE. DURCH FUTTER-INTENSIVIERUNG VERURSACHTE PROBLEME.

Spurenelementekarenzen bei Wiederkäuern sind in Frankreich wenig bekannt, aufgrund ihrer schwierigen Diagnose. Eine systematische Kartographie könnte dem Tierarzt bei ihrer Identifizierung helfen ; in dieser Absicht wurde, für das ganze Staatsgebiet, die Lokalisierung derjenigen Böden, die im Ausland gewöhnlich Karenzerscheinungen auslösen, unternommen. Eine Umfrage ist bei den Tierärzten und Züchtern im Gange. Die ersten Ergebnisse dieser kaum angelaufenen Untersuchung, zeigen das fast sichere Vorhandensein von Kupfer-Subkarenzen in sauren Leichtböden oder bei stark verwitterten Gesteinen.

Die Futter-Intensivierung verändert jedoch in starkem Masse die Wechselwirkung zwischen Boden und Pflanze ; ein Zurückgreifen auf ausgewählte Arten, auf Fruchtbarmachung, Bewässerung, usw. kann die natürlichen Karenzen erschweren oder neue Karenzen bei Tieren in Erscheinung treten lassen, die nicht zusätzlich geeignete mineralische Nährstoffe erhalten. Die Fruchtbarmachung durch Kupfer von Wiesen kann eine gültige Lösung darstellen, jedoch in noch zu bestimmenden Grenzen, die sich mit der Natur der Flora verändern.

## РЕЗЮМЕ

*Недостаточность в микроелементах у животных во Франции и ее диагностика. Трудности связанные с интенсификацией кормовой продукции.*

Симона ПЭРИГО.

Недостаточность микроелементов у жвачных мало известна во Франции, ибо она трудно поддается диагностике. Их систематическая картография может хорошо помочь практиканту для отожествления; для этого, на территории Франции была проведена локализация типов почв обычно недостаточно обеспеченных микроелементами за границей; в настоящее время ведется, кроме того, анкета среди ветеринаров и животноводов. Первые результаты этого, только-что начатого изучения, указывают на существование суб-недостаточностей меди в легких кислых почвах и в сильно выветренных породах.

Кроме того, интенсификация кормовой продукции изменяет взаимосвязь почва — растение; применение видов растений прошедших селекцию в смысле фертилизации и орошения, может увеличить природный дефицит, или вызвать появление новых недостаточностей у животных, которые к тому-же не получают в рационе достаточной минеральной добавки. Внесение медных удобрений под луга может оказаться хорошим разрешением вопроса, но медь должна применяться в пределах еще как следует не установленных, меняющихся в зависимости от флоры.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANKE M., 1961. Trace elements in grassland and field plants on various soils in Thuringia. *Sonderh. aus Zeitsch. für Acker und Pflanzenbau*, **112**, (2), 113-140.

ANKE M., SASUM K., OLL U., GRAUPE B., 1962. De la composition de la luzerne en relation avec les sols (formations géologiques). *Arch. für Tierernähr.*, **12**, (2), 93-108.

BARSHAD I., 1948. Mo content of pasture plants in relation to toxicity to cattle. *Soil Sci.*, **66**, 187-195.

BEESON K. C., GRAY L., SMITH S. E., 1944. Some areas in eastern United States associated with deficiencies of cobalt and other elements in the soil. *Proc. Soil Soc. Amer.*, **9**, 164-168.

BELLANGER J., LAMAND M., PÉRIGAUD S., 1970. La carence en cuivre chez les ruminants. *Ann. Nutr. Alim.*, **24**, 1-62.

COPPENET M., CALVEZ J., 1956. Sur l'origine des carences en cuivre. *VI^e C. I. S. S.*, **2**, (13), 493-497.

COPPENET M., 1968. Les oligo-éléments. *B. T. I.*, (231), 595-608.

DEKOCK P. C., CHESHIRE M. V., 1968. The relationship between trace elements in soils and plants. *Rep. Welsh Soils Discuss Grp.*, **9**, 98-108.

DROUINEAU G., MAZOYER R., 1962. Contribution à l'étude de la toxicité du Cu dans les sols. *Ann. agron.*, **13** (1), 31-53.

F. A. O., 1961. Cooperative research project on trace elements of the sub-commission on Agricultural research of the European Commission on Agriculture. *Rapp. Congr. Dublin 1959*, pp. 61.

FARRAR K., 1968. Trace elements and magnesium in basic slag and their value to plants. *Agric. Digest.*, **15**, 3-19.

FLEMING G. A., 1963. Distribution of major and trace elements in some common pasture species. *J. Sci. Food Agric.*, **14** (3), 203-208.

FLEMING G. A., 1965. Trace elements in plants with particular reference to pasture species. *Outl. Agric.*, **4**, 270-285.

FLEMING G. A., MURPHY W. E., 1968. The uptake of some major and trace elements by grasses as affected by season and stage of maturity. *J. Brit. Grassl. Soc.*, **23** (2), 174-185.

GARDINER M. R., GORMAN R. C., 1963. Further observations on plant selenium levels in Western Australia. *Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb.*, **3**, (11), 284-290.

GARDINER M. R., 1966. Chronic selenium toxicity studies in sheep. *Austr. Vet. J.*, **42**, 442-448.

GAWECKI K. C., ILECKI J. H., PONIKIEWSKA T. J., 1968. Content of trace element in forage crops in relation to the stage of development of the plants, the method of gathering and storage. *Final report period from 10-4-1963 to 30-6-68*, Poznan.

HÉDIN M. L., KERGUELEN M., 1962-63. Les problèmes fourragers en Lozère. *Bull. Féd. Fr. Écon. Mont.*, **13**, 621-667.

HÉDIN M. L., KERGUÉLEN M., 1964-65. Notes sur la situation fourragère en Cerdagne et dans le Capcir. *Bull. Féd. Fr. Écon. Mont.*, **15**, 417-431.

HEMINGWAY R. G., 1962. Copper, molybdenum, manganese and iron contents of herbage as influenced by fertilizer treatments over a three-year period. *J. Brit. Grassl. Soc.*, **17**, (3), 182-187.

HEMINGWAY R. G., MCPHERSON A., DUTHIE A. K., BROWN N. A., 1968. The mineral composition of hay and silage grown in Scotland in relation to the A. R. C. standards for the mineral requirements of dairy cattle. *J. Agric. Sci. Camb.*, **71**, (1), 53-60.

KERGUÉLEN M., 1960. Aspects des variations de la composition de quelques fourrages en fonction des espèces, des stades de végétation, des conditions du sol et de fertilisation. *Ann. Amélior. Pl.*, **10**, 177-236.

KERGUÉLEN M., 1962. Valeur minérale de l'herbe (en oligo-éléments). Influence du sol et de la fumure sur la composition minérale. *Fourrages*, **10**, 63-71.

KIRCHGESSNER M., MERZ G., OELSCHLAGER W., 1960. L'influence du stade de végétation sur la teneur en macro- et en oligo-éléments de trois sortes d'herbe. *Arch. Tierernähr.*, **10** (6), 414-427.

KIRCHGESSNER M., 1965. *De l'approvisionnement en oligo-éléments et de leur disponibilité.* Féd. Europ. de Zootech.-Comm. d'Alim. des Anim. domest. Noordwick, 425.

KUBOTA J., LAZAR V. A., LANGAN L. N., BEESON K. C., 1961. The relationship of soils to molybde num toxicity in cattle in Nevada. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **25**, (3), 227-232.

KUBOTA J., ALLAWAY W. H., CARTER D. L., CARY E. E., LAZAR V. A., 1967. Selenium in crops in the United States in relation to selenium-responsive diseases of animals. *J. agric. Food. Chem.*, **15**, 448-453.

LAMAND M., 1965. Syndrome myopathie-dyspnée : influence de la prophylaxie par le sélénium sur la composition biochimique du plasma chez le veau. *Ann. Biol. Anim. Biochim. Biophys.*, **5** (2), 309-315.

LAMAND M., 1966. Dystrophies musculaires des jeunes ruminants. *Ann. Nutrit. Alim.*, **20**, (3), 13-39.

LAMAND M., 1969. Dosage du sélénium dans les produits biologiques et mélanges minéraux alimentaires. *Ann. Fals. Exp. Chim.*, **1**, 4-12.

LAMAND M., 1970. Carences en oligo-éléments chez les ruminants. *Cahiers Méd. vét.*, **39** (2), 60-75.

LAMAND M., BELLANGER J., GEAY Y., 1969. Carence en cuivre chez des taurillons à l'engrais, son influence sur la croissance et son traitement. *Ann. Zootechn.*, **18** (2), 227-229.

LOPER G. M., SMITH D., 1961. Changes in the micronutrient composition of herbage of alfalfa, medium red clover, Ladino clover and bromegrass with advance in maturity. *Res. Rep.* 8, *Wis. agric. Exp. Stn.*, pp. 19.

LUNDBLAD K., SVANBERG O., EKMAN P., 1949. The availability and fixation of copper in Swedish soils. *Plant and Soil*, **1** (4), 277-301.

MAC PHERSON A., HEMINGWAY R. G., 1968. Effects of liming and various forms of oral copper supplementation on the copper status of gazing sheep. *J. Sci. Food Agric.*, **19**, 53-56.

MITCHELL R. L., 1960. Trace elements in Scottish soils. Minor elements in nutrition. *Sci. meeting Hannah dairy Res. Inst. Kirkhill-Ayr*-30.4.60.

MITCHELL R. L., 1965. Trace elements in soils. p. 320-368. *Chemistry of the Soil*, 2nd Ed., Publ. par Firman E. Bear (London), 515 p.

NEENAN M., WALSH T., O'MOORE L. B., 1956. Some soil and herbage factors associated with the incidence and treatment of molybdenum conditional hypocuprosis on Irish pastures. *Int. Grassland Congr., Proc. 7th Congr. New Zealand Paper* nº 31 A, 345-356.

PEDRO G., 1968. Notes sur le type d'altération superficielle caractérisant les projections volcaniques récentes du Puy-de-la Vache (Massif central). Conséquences géochimiques. *Bull. Ass. fr. Ét. Sol*, 3, 17-20.

PEDRO G., 1968. La prospection géochimique des éléments-traces dans les sols avec établissement de cartes géochimiques superficielles (son utilisation en métallogénie et son intérêt en agronomie). *Rapport interne Agronomie* (I. N. R. A.), pp. 71.

PIZER N. H., CALDWELL T. H., BURGESS G. R., JONES J. L. O., 1966. Investigations into copper deficiency in crops in East Anglia. *J. agric. Sci. Camb.*, **66**, 3, 303-314.

REITH J. W. S., MITCHELL R. L., 1964. The effect of soil treatment on trace element uptake by plants. Plant Analysis and Fertilizer problems. *Proc. fourth Colloq.*, 241-254.

ROBINSON W. O., EDGINTON G., 1954. Availability of soil molybdenum, as shown by the molybdenum content of many different plants. *Soil Sci.*, **77**, 237-251.

RUSSEL F. C., DUNCAN D. L., 1956. Minerals in pasture : deficiencies and excesses in relation to animal health. *C. A. B. Commonw. Bur. anim. nutrit., Techn. comm.*, nº 15, pp. 170.

SCHMITT L., JUNGERMANN K., 1964. The effect of modern methods of fertilizing on the trace-element content of fodder and agricultural crops. *V. Fertil. Wld Congr. C. I. T. A., Rapp. Gén.* V, p. 15.

SCHUTTE K. H., 1964. *International monographs : aspect of animal and human nutrition. The biology of the trace elements. Their role in nutrition.* Crosby Lockwood and Son, London, pp. 228.

STABLES J. W., 1969. A study of fertility and production in low cost. Production Herds. *Vet. Rec.*, **84**, 379-390.

UNDERWOOD E. J., 1966. *The mineral nutrition of livestock.* Publ. par C. A. B. pour F. A. O., Ed. The Central Press Aberdeen, pp. 237.

WILLIAMS R. D., 1959. Minor elements and their effects on the growth and chemical composition of herbage plants. *C. A. B., Commonw. Bur. Past. Fld crops*, 68 p.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (5), 671-692.

# LES OLIGO-ÉLÉMENTS EN ARBORICULTURE ET EN VITICULTURE

Claire HUGUET

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches d'Avignon, 84-Montfavet*
*Institut National de la Recherche agronomique*

RÉSUMÉ

Les caractères originaux de l'alimentation en oligo-éléments des cultures pérennes tiennent aux mécanismes physiologiques des arbres fruitiers et de la vigne : les vagues de croissance des rameaux et des racines, la mise en réserve des éléments dans les tissus et leur redistribution dans la plante.

Dans les vergers et les vignobles, les techniques spécifiques mises en œuvre, la taille, l'entretien du sol au moyen de cultures associées, participent également à l'originalité de l'alimentation des plantes pérennes.

Dans la pratique, le maniement des oligo-éléments fait appel aux évaluations globales concernant les prélèvements annuels des différentes espèces. Mais la cinétique de l'absorption dans la plante de chacun des éléments-traces représente une source d'informations utile à la programmation du rythme des apports, si des interventions s'avèrent nécessaires dans les cultures.

Le diagnostic des malnutritions en éléments-traces fait appel au groupement des symptômes visuels spécifiques, reconnus sur les plantes, mais plus précisément à l'analyse du sol et du végétal.

On indique les diverses méthodes préventives et curatives des accidents que l'on attribue aux oligo-éléments.

Dans les cultures intensives, en l'absence de signe de carence, se pose aussi le problème des apports périodiques des oligo-éléments, afin d'assurer la qualité de la production.

Dans leur ensemble, les problèmes relatifs aux oligo-éléments que posent les cultures pérennes ne diffèrent pas notablement de ceux que soulèvent les plantes annuelles. A cet égard, on peut reprendre, en la synthétisant, la classification des rubriques énoncées par COPPENET (1968) :

— le diagnostic des carences et des toxicités, leur guérison ;

— en l'absence de signe de carence, l'entretien du niveau alimentaire optimal des cultures.

Dans le cas des plantes pérennes, la résolution des problèmes cités paraît extrêmement utile, faute de quoi on risquerait d'hypothéquer les exploitations arboricoles et viticoles pour l'avenir.

L'évocation simplifiée des buts à atteindre, n'exclut pourtant pas l'originalité des systèmes culturaux concernés par la vigne et par les arbres fruitiers. Les particularités à souligner s'appliquent à la biologie des espèces comme aux modalités culturales réservées aux deux types de plantes.

On s'accordera pourtant la faculté d'exposer dans un même chapitre les problèmes relatifs aux éléments traces des deux systèmes de production, sans ignorer toutefois les différences fondamentales du comportement physiologique entre les espèces fruitières arborescentes et les plantes ligneuses vivaces, comme la vigne. Dans le cadre de ce travail, on exclut toute étude de physiologie comparée. Le vocable de « cultures pérennes » peut justifier leur rapprochement : à la longue durée d'occupation du sol, on associe l'activité annuelle quasi-permanente des processus biochimiques qui règne au sein du végétal, malgré un ralentissement évident en période hivernale.

## I. — QUELQUES ÉLÉMENTS DE LA PHYSIOLOGIE DES ESPÈCES PÉRENNES

Les phénomènes rythmiques de la croissance, qu'il s'agisse de la partie aérienne des plantes ou du système radiculaire, représentent le premier point original digne d'être signalé. On soulignera également le rôle prépondérant des organes pérennes, véritables réservoirs des ressources alimentaires à l'égard du végétal. Le rappel succinct donné ci-dessous mériterait un plus large développement : le lecteur aura alors recours aux ouvrages spécialisés : BUGNON et BESSIS (1968) sur la biologie de la Vigne, GARDNER et BRADFORT (1952) traitant la production fruitière.

1. 1. *Chez les arbres fruitiers, il existe des vagues de croissance.* On en reconnaît généralement trois chez le Pommier. On sait qu'il est possible d'altérer l'expression de ce rythme, soit en jouant sur les disponibilités nutritives de la plante, soit en modifiant les relations de compétition entre tissus ou entre organes en croissance. Dans la pratique, c'est à la fertilisation et aux opérations de taille que l'on attribue ces rôles prépondérants à l'égard de la croissance des arbres. La croissance globale des sarments de vigne est elle-même caractérisée par une variation unimodale, dont la durée se prolonge parfois sur plus de deux mois, en période de vitesse maximale.

Chez les arbres fruitiers, une phase d'induction précède les phénomènes du développement qui correspondent à la création de nouveaux organes. Elle se déroule en période estivale, tandis que le végétal croît d'une manière particulièrement active. L'initiation des bourgeons, qui s'ensuit, est alors responsable de la mise à fruits au cours de l'année suivante. Une superposition très marquée des phénomènes du développement annuel et des phases de la croissance caractérise plus particulièrement les arbres fruitiers. Aussi reconnaît-on l'importance des conditions de la nutrition qui prévalent au cours des deux années précédant la floraison et la fructification.

Malgré l'imprécision que revêt cette conception, on admet qu'il existe un rapport Carbone/Azote caractéristique des composantes de la sève et favorable à la différenciation des bourgeons en boutons à fruits.

La vigne pose des problèmes tout aussi complexes de caractéristiques fonctionnelles. BUGNON et BESSIS (1969) indiquent qu'il y a lieu de distinguer les phénomènes morphologiques propres aux sarments et les données physiologiques liées aux bourgeons latéraux. On possède actuellement des renseignements précis sur le devenir des bourgeons latéraux axillaires, organes qui, après une phase automnale de dormance, évoluent au cours de la deuxième année. Aux propriétés fixées du matériel végétal, s'ajoutent des corrélations actuelles et des phénomènes complexes dus à la vigueur, qui donnent toute son originalité au comportement de la Vigne.

1. 2. *Le développement des racines des* arbres fruitiers et de la vigne progresse rapidement dès les premières années de mise en place de la culture. Tout en conservant un rythme d'activité annuelle propre à chaque espèce, le comportement des racines dans le sol dépend aussi des conditions climatiques, comme des interventions anthropiques succcessives. C'est ainsi que l'allongement radiculaire annuel du Pommier est caractérisé par deux périodes d'activité maximale, mais on estime la taille des rameaux capable d'en modifier l'intensité.

En fait, l'exploration radiculaire de la Vigne et des arbres fruitiers intéresse des couches de sol variables en volume ou en nature et l'on reconnaît aux espèces pérennes une densité d'exploration inférieure à celles des cultures annuelles. On admettra alors, avec DELMAS (1969) l'importance de la fraction du profil où s'installent les racines, et l'influence qu'elle exerce vis-à-vis de l'alimentation des cultures en éléments-traces. Cette affirmation souligne l'intérêt qui s'attache aux études du profil cultural, telles que les ont préconisées HÉNIN *et al.* (1960) dans leur ouvrage. De fait, un certain nombre d'observations concernant l'alimentation des plantes pérennes en éléments mineurs ont été rattachées à la localisation particulière des racines dans le sol. Pour n'en citer que quelques-unes : la lenteur de l'apparition des symptômes caractéristiques d'une déficience ; la durée variable de ces symptômes, parfois limitée à la période juvénile des arbres, ou à l'âge adulte de la vigne ; dans un même verger, la présence d'individus qui manifestent isolément des anomalies de leur système aérien.

1. 3. *La distribution saisonnière* des éléments nutritifs dans la sève, dans les organes au niveau des différents tissus, est une notion désormais admise à la suite notamment des travaux de BOLLARD (1957) sur le Pommier, et de l'importante contribution de BOUARD (1966) relative à la Vigne. Dans le végétal, la teneur de chaque élément minéral ou de chaque composé organique est soumise à des fluctuations continuelles qui présentent des valeurs maximales ou minimales caractéristiques du stade végétatif. Mais, fait remarquable, lorsque les arbres, ou la Vigne, paraissent en repos complet, il existe une certaine activité métabolique que GOUNY et HUGUET (1968) ont localisée dans les bourgeons de Poiriers, tandis que BOUARD (1967) l'a détectée dans les sarments de la Vigne.

D'autres processus importants ont été progressivement mis en lumière. C'est ainsi qu'a été confirmé le rôle notable joué par les substances minérales et organiques élaborées, mises en réserve, puis redistribuées dans le végétal au cours des premiers mois de la croissance. Mais les informations relatives à la localisation de ces réserves

dans les tissus demeurent encore très fragmentaires. D'une manière générale, chez le pommier comme chez la Vigne, on affirme le rôle essentiel joué par les tissus ligneux dès le stade critique du débourrement ; chez le Pêcher, lors des premiers processus du développement, on est assuré de l'efficacité des composés qui se sont accumulés dans les racines au cours de la phase estivale. Cependant, le devenir des réserves en oligo-éléments des plantes pérennes ne paraît pas avoir été traité d'une manière très détaillée.

## II. — ORIGINALITÉ DES INTERVENTIONS CULTURALES A L'ÉGARD DES PLANTES PÉRENNES

Les actions variées et originales qu'exerce l'arboriculteur ou le viticulteur à l'égard des cultures pérennes se situent essentiellement aux deux niveaux qui vont être examinés.

2. 1. *La taille, destinée* à assurer une fructification abondante, tient compte des aptitudes biologiques particulières de chacune des espèces et même de chaque cultivar. Elle se propose de valoriser la potentialité de chaque individu. On lui reconnaît un rôle perturbateur au sein du végétal, dont DULAC (1964) a mesuré les effets vis-à-vis de la concentration en éléments majeurs dans la feuille de vigne ; mais les répercussions de la taille à l'égard des éléments-traces n'ont pas été appréciées jusqu'ici.

2. 2. *En verger comme en vignoble,* on fait appel, de façon courante, à des modes *variés d'entretien du sol.* En France, TROCMÉ (1966) a fait état des actions qu'exercent le désherbage total du sol, une culture d'engrais vert ou un engazonnement, comparativement à la technique du sol nu travaillé. Les travaux de cet auteur concernent aussi bien la nutrition des arbres en éléments majeurs que celle en certains éléments mineurs. Le seul fait qu'il existe des interactions au cours de l'absorption des deux groupes d'éléments milite en faveur de tels examens.

## III. — ÉVALUATION DES BESOINS TOTAUX EN OLIGO-ÉLÉMENTS

Les difficultés soulevées par ces évaluations ont été signalées à diverses reprises à l'égard des éléments majeurs ; elles se retrouvent avec tout autant d'acuité dans l'estimation des éléments traces. Rarement a-t-on sacrifié des arbres dans leur intégralité pendant un nombre suffisant d'années, ou même, a-t-on pris en compte l'accroissement annuel des parties aériennes. Il n'est pas certain, du reste, que la composition de la plante entière, déterminée à un instant donné, puisse refléter les quantités maximales réellement mises en jeu. On admettra donc avec TROCMÉ (1959) le caractère approximatif des données suivantes (tabl. 1) établies pour une espèce à pépins.

De la même façon, la progression des besoins en oligo-éléments chez les arbres à noyau demeure insuffisamment connue : du fait de leur détermination instantanée, les références chiffrées ont un caractère statique indubitable. Un hectare de cerisiers

produisant 10 tonnes de fruits a exigé environ 290 g de bore et 230 g de zinc, si l'on tient compte des éléments prélevés par les fruits et par les feuilles (HUGUET, 1966).

Quant aux valeurs globales de chacun des oligo-éléments prélevés par la Vigne,

TABLEAU I

*Prélèvements des pommiers en oligo-éléments, g par tonne de fruits*
(TROCMÉ, 1959)

| Organes | Fer | Cuivre | Zinc | Manganèse | Bore |
|---|---|---|---|---|---|
| Fruits ..... | 3 | 1,2 | 1 | 0,5 | 2,0 |
| Feuilles ..... | 12 | 1,0 | 4 | 2,0 | 2,5 |
| Organes ligneux ..... (Accroissement annuel) | 4 | 0,5 | 1 | 0,5 | 1,0 |
| Total ..... | 19 | 2,7 | 6 | 3 | 5,5 |

elles sont de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de grammes à l'hectare. En sol argilo-calcaire des Charentes, LAFON *et al.* (1964) font état des besoins respectifs des principaux organes aériens, valeurs relatives à un hectare du cépage *Ugni-Blanc* greffé sur 41 *B* (tabl. 2).

TABLEAU 2

*Quantité d'oligo-éléments absorbés par le cépage* Ugni Blanc(g/ha)
(LAFON *et al.*, 1964)

| | Fer | Manganèse | Bore |
|---|---|---|---|
| Feuilles ..... | 332 | 44 | 40 |
| Rameaux ..... | 65 | 9 | 18 |
| Grappes ..... | 168 | 22 | 50 |
| Total ..... | 565 | 75 | 108 |

## IV. — TRANSFERT DES OLIGO-ÉLÉMENTS DANS LA PLANTE

En abordant l'aspect dynamique de l'absorption et de la migration des éléments traces au sein du végétal, on est assuré d'apporter des précisions chronologiques intéressantes ; la plupart du temps, de tels développements ont été limités à l'étude de quelques organes. Chez le Poirier, on distingue plusieurs phases, caractérisées par l'intensité des phénomènes de transfert et leur durée (GOUNY et HUGUET, 1964). Au niveau des bourgeons, une première phase correspond à des migrations de faible

intensité ; débutant dès l'initiation de ces organes, elle se prolonge pendant une fraction du repos hivernal. Au cours de la phase dite active, et avant que ne s'amorce l'évolution morphologique des bourgeons, on assiste à des modifications importantes de la teneur de certains oligo-éléments. Pendant l'année, il existe des périodes caractérisées par des pics d'absorption, dont l'intensité et la durée varient avec chacun des éléments mineurs. C'est ainsi que, dans les organes fructifères du Poirier, l'absorption maximale du bore précède par exemple celle du manganèse (fig. 1). De la même manière, on déduit de l'étude de LAFON *et al.*, déjà citée (1964), l'existence d'une absorption maximale en bore et en fer des feuilles de Vigne, antérieurement à celle du manganèse (fig. 2-3). Chaque organe se comporte du reste de façon originale : l'activité boratée au sein des rameaux cesse dès la mi-août, tandis que dans les grappes, le transfert du bore se poursuit jusqu'au début octobre.

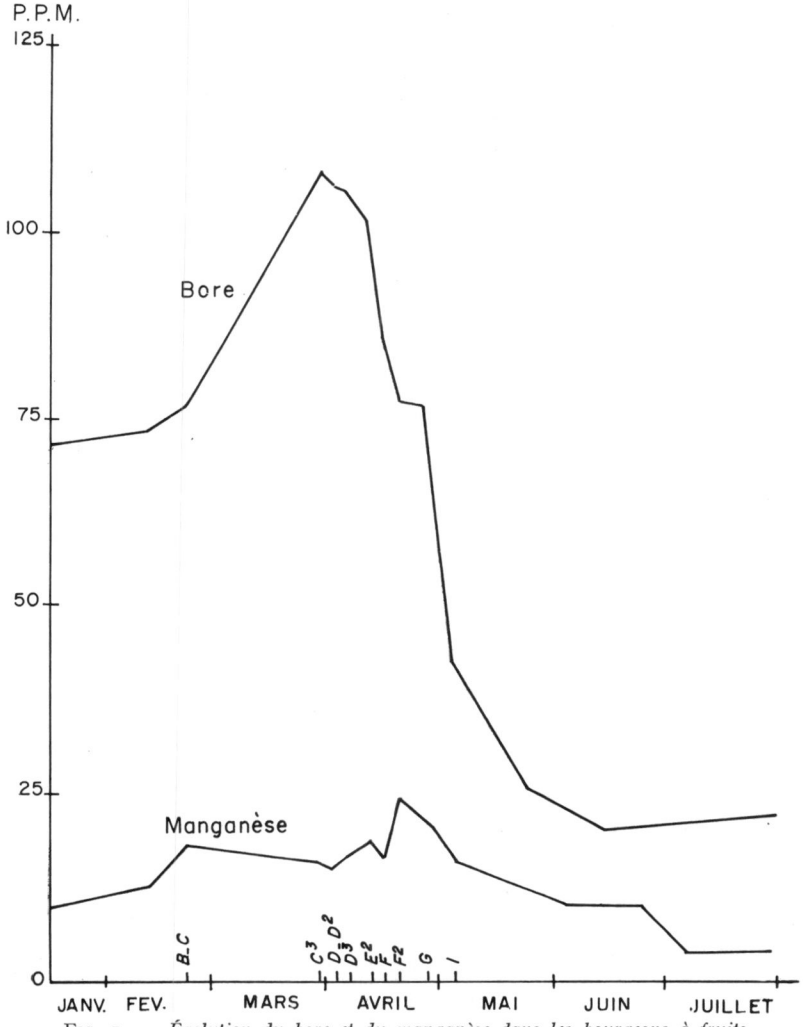



FIG. 1. — *Évolution du bore et du manganèse dans les bourgeons à fruits et bouquets feuilles-fruits du poirier.*
(B et Mn sont exprimés en p.p.m. de M. S.)

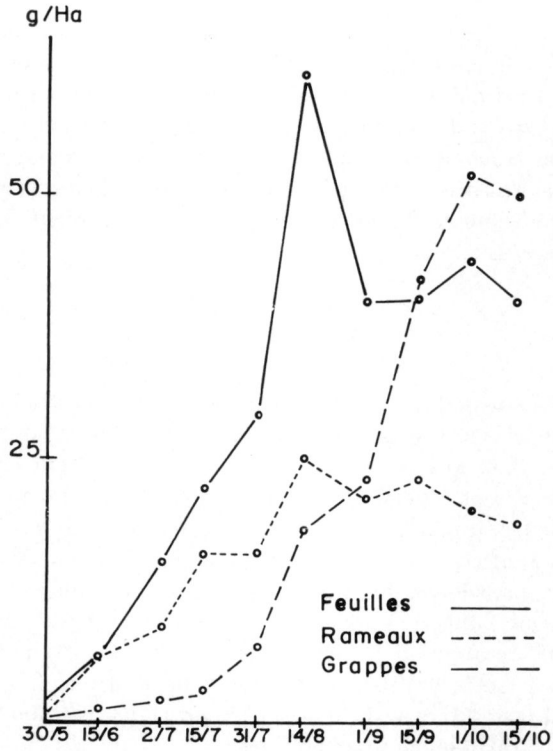



FIG. 2. — *Absorption annuelle du bore par la Vigne* (Lafon *et al.*).

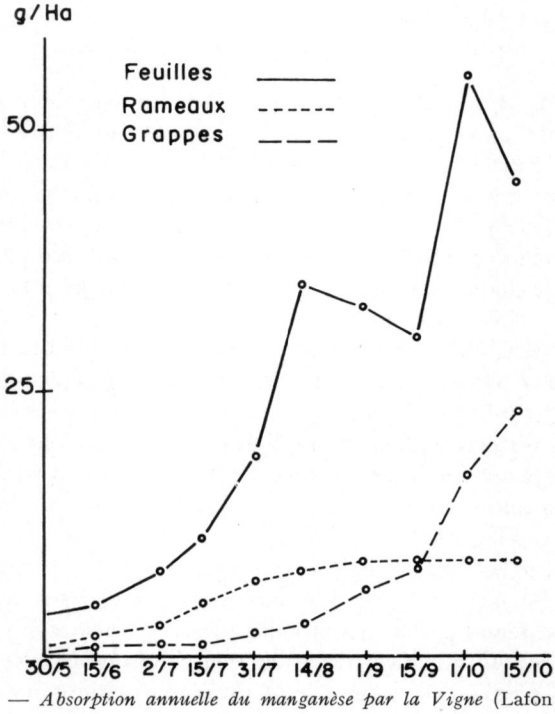



FIG 3. — *Absorption annuelle du manganèse par la Vigne* (Lafon *et al.*).

Trois données fondamentales caractérisent l'alimentation en oligo-éléments du végétal : la concentration de chacun des éléments traces dans les différents organes, leur vitesse de migration dans les tissus, et la quantité totale absorbée annuellement. Ces déterminations trouvent des applications dans la pratique agricole : comme base de l'évaluation des restitutions à opérer, elles précisent la période préférentielle des ajustages en oligo-éléments, si les réserves du sol pourvoient insuffisamment aux exigences des cultures.

## V. — LE FER

Cet élément, transporteur d'oxygène, joue un rôle essentiel dans la respiration des plantes ; il intervient également dans la régulation catalytique des systèmes oxydo-réducteurs. Bien que ce métal n'entre pas directement dans la composition de la chlorophylle, il agit cependant sur la constitution du noyau pyrrolique.

Des phénomènes désignés sous le terme général de chlorose affectent la vigne comme les arbres fruitiers ; ils précèdent l'apparition de nécroses de tissus, puis celle du stade cottis, et, dans les cas les plus aigus, la mort des rameaux.

Chaque fois que l'affection constatée sur les cultures peut être corrigée par un composé approprié renfermant du fer, on estime qu'on se trouve en présence d'une chlorose ferriprive. Actuellement, on reconnaît la multiplicité des facteurs responsables des troubles et les modifications profondes des métabolismes de la plante qui accompagnent les anomalies perceptibles.

### 5. 1. *Modification des métabolismes de la plante et de la composition des tissus chlorosés*

Les troubles de la synthèse chlorophyllienne auraient comme origine un arrêt de la formation des protoporphyrines ou d'un acide ribonucléique, par l'intermédiaire des modifications de l'activité enzymatique : celles de la catalase et de la peroxydase ont été mises en évidence chez les arbres fruitiers par Drouineau et Gouny (1946). De même, Pouget (1965) a montré que, chez les feuilles du genre *Vitis*, l'altération de la chlorophylle perturbe l'inhibition corrélative des bourgeons, d'où le dérèglement anarchique des anticipés et des bourgeons latents qui prolifèrent de façon anormale.

Au sein des tissus chlorosés, il existe également des modifications importantes des taux de certains éléments minéraux, en particulier du calcium et du potassium (Drouineau, 1943 ; Gouny et Mazoyer, 1951). Par contre, la teneur en fer des organes n'est pas systématiquement impliquée par ces modifications. Cette observation signifie que le dosage du fer dans les feuilles ne peut constituer ni une méthode de diagnostic applicable aux végétaux atteints de chlorose, ni un moyen suffisant dans la recherche des causes de ces troubles.

On admettra, avec Pouget et Juste (1965), l'existence de substances naturelles capables de protéger le fer de l'insolubilisation et d'assurer son transport depuis les racines jusqu'aux feuilles. Parmi ces substances, les acides organiques semblent jouer un rôle primordial : l'acide citrique augmente dans les feuilles des vignes chlorosées (Carlès *et al.*, 1963), alors que l'acide tartrique diminue notablement.

### 5. 2. *Influence des facteurs du milieu sur l'absorption en fer par les plantes*

A l'heure actuelle, on met en cause une quinzaine de facteurs, qui, isolément ou en combinaison, interfèrent sur l'absorption du fer, et en modifient l'activité dans la plante (GUENNELON, 1961).

— Dans le cas des plantes pérennes, on reconnaît tout d'abord l'importance des propriétés physiques ou chimiques des sols : des taux élevés de calcaire ou de bicarbonate, des teneurs excessives en azote nitrique, en phosphore, en cuivre, en manganèse ou en zinc, accompagnent l'apparition des phénomènes chlorotiques.

— L'intervention néfaste de certaines opérations culturales, créée des conditions asphyxiantes pour les racines. C'est ainsi que des irrigations trop abondantes conduisent à un engorgement excessif du sol, et que le passage répété des instruments provoque un tassement exagéré au niveau des racines ; l'incorporation de matières organiques peut être aussi inopportune et favoriser les phénomènes de chlorose.

— Des températures extrêmes, comme une luminosité excessive, ou même une répartition défectueuse des précipitations, représentent également les facteurs climatiques responsables de certaines affections chlorotiques, relevées dans les vergers et les vignobles.

La chlorose calcaire est désormais considérée comme un cas particulier de la chlorose ferrique. Le pouvoir chlorosant des sols, tel que l'ont défini DROUINEAU et GOUNY (1952), dépend essentiellement de l'abondance du calcaire très fin : d'où l'intérêt que l'on accorde généralement à la détermination de cette mesure dans les sols destinés aux plantations de vigne ou d'arbres fruitiers.

Cependant, la chlorose calcaire est également en relation avec le pH du sol, valeur qui dépend du système $CO_3Ca$-$CO_2$-$H_2O$ (DROUINEAU, 1963). C'est la raison qui conduit LIWERANT (1960) à mesurer le pH des sols de vergers. Cet auteur donne, à titre indicatif, les valeurs limites à partir desquelles la chlorose risque d'apparaître en vergers (tabl. 3). Du reste, le blocage du fer par les ions bicarboniques du sol

TABLEAU 3

*Valeurs limites du pH favorables à l'apparition de la chlorose* (LIWERANT, 1960)

| | |
|---|---|
| Pêcher franc ..... | pH supérieur à 7,7 |
| Pêcher sur prunier ..... | pH supérieur à 7,9 |
| Cognassier ..... | pH supérieur à 8,1 |

est un mécanisme très discuté. D'après JUSTE et POUGET (1967), l'anion bicarbonique semble agir par son pouvoir tampon élevé dans la zone des pH alcalins. L'absorption de $^{59}Fe$ par les racines de la Vigne est d'autant plus inhibée que le pH initial du milieu de culture est plus élevé.

### 5. 3. *La sensibilité des espèces à la chlorose ferrique*

On connaît l'influence prépondérante qu'exerce la nature des porte-greffes de la vigne et des arbres fruitiers sur le développement de la chlorose. Cette constatation traduit en fait le rôle sélectif du système radiculaire à l'égard des mécanismes physiologiques qui révèlent une carence ferrique.

En étudiant les propriétés des surfaces radiculaires, BLANC-AICARD et DROUINEAU (1955) ont établi une relation entre la sensibilité à la chlorose et la capacité de saturation en calcium des racines de la vigne : les porte-greffes sensibles tels que le *Riparia* × *Rupestris 3309* et le *Rupestris* du Lot possèdent une capacité élevée. La quantité de gaz carbonique dégagée par unité de temps, par la respiration radiculaire, traduit également les différences de résistance à la chlorose que l'on reconnaît chez le *Berlandieri 41 B*, le *Riparia* × *Rupestris 3309* et le *Rupestris* du Lot. Enfin, le pouvoir réducteur des racines est d'autant plus élevé que la variété est moins sensible au calcaire.

Dans la pratique, on se réfère à l'échelle de résistance des porte-greffes de la Vigne telle que l'a établie GALET (1947). Par ailleurs, l'échelle de sensibilité à la chlorose des porte-greffes du Pêcher et du Poirier résulte de l'ensemble des données recueillies depuis les premières études de DROUINEAU.

### 5. 4. *Améliorations des techniques de lutte contre la chlorose ferriprive*

Les progrès réalisés en matière de lutte contre la chlorose ferriprive font appel à deux groupes de moyens : l'amélioration génétique du matériel végétal, et l'utilisation de méthodes chimiques correctives.

— En règle générale, les solutions génétiques font intervenir des critères de sélection basés sur les mécanismes cellulaires qui influencent cette maladie physiologique. C'est ainsi que, dans le choix du matériel végétal que réalise la Station d'Arboriculture de la Grande-Ferrade, figurent, à la fois, la résistance à la chlorose et à l'asphyxie radiculaire des porte-greffes du Pêcher. A cet effet, on jugera l'intérêt du comportement des porte-greffes actuellement proposés en se référant au tableau 4.

TABLEAU 4

*Caractéristiques de porte-greffes du Pêcher*
*Données des Stations de Recherches Fruitières de l'I. N. R. A.*
(CHARTIER, C. T. I. F. L., 1969)

| | Résistance à la chlorose | Résistance à l'asphyxie |
|---|---|---|
| Franc de semis ..... | Très faible | |
| Nemaguard..... | Très faible | |
| Pêcher G F. 305 ..... | Faible | Faible |
| St-Julien A ..... | Faible | |
| St-Julien hybride n° 1 .. | Supérieure au St-Julien A | Bonne |
| Prunier G. F. 43 ..... | Moyenne | Bonne |
| St-Julien G. F. 655-2 ... | Inférieure au Damas de Toulouse | Bonne |
| Damas 1869 ..... | Bonne | Bonne |

Les travaux de sélection sur les porte-greffes du Poirier, entrepris par BROSSIER, à la Station d'Angers, tiennent compte à la fois des mesures de capacité d'échange en ions calcium des racines et des possibilités d'absorption du fer par deux types de

Cognassier (BROSSIER, 1965-1966). Dans l'état actuel des travaux, la méthode adoptée suggère une moindre sensibilité du Cognassier de Provence à la carence ferriprive, comparativement au Cognassier d'Angers.

Si la sélection des porte-greffes paraît la technique la plus satisfaisante, elle n'offre, pour l'instant, qu'une gamme limitée de porte-greffes adaptés aux variétés dont on dispose pour une espèce donnée.

— Les méthodes chimiques correctives ou préventives de la carence en fer appliquées en arboriculture et en viticulture ont peu progressé jusqu'en 1950 (1). Par ailleurs, l'emploi des sels de fer, soit sous forme de sulfate mis au sol, soit de citrate ou de tartrate appliqué en badigeonnage, en pulvérisation sur le feuillage, ou en injection dans le tronc, ne donnaient que des corrections très insuffisantes et souvent aléatoires.

L'apparition des chélates de fer a ouvert une voie nouvelle dans le domaine de la correction de la chlorose ferriprive ; ces composés se sont montrés d'autant plus efficaces qu'ont été mieux précisées leurs modalités d'utilisation. A la suite des travaux de CHABANNES *et al.* (1958), ceux de GUENNELON (1962) préconisent l'emploi de l'E. D. D. H. A.-NaFe ; l'auteur assure la bonne efficacité du produit en vergers, par incorporation au sol, au départ de la végétation. La critique généralement formulée à l'égard de ces composés est leur arrière effet très limité dès la deuxième année. Dans la pratique, on reconnaît aussi l'utilité des pulvérisations de E. D. T. A.-$Na_2Fe$ que l'on applique de façon précoce sur la frondaison.

Parmi les complexes organiques actuellement disponibles, citons les polyflavonoïdes. Leur action est nulle quand ils sont appliqués au sol, au moins, dans certaines conditions (TROCMÉ, information non publiée) ; pulvérisés sur la frondaison, ils ne provoquent qu'un reverdissement partiel (travaux non publiés sur le ceriser, HUGUET). Des conclusions identiques découlent des essais de BISSON dans les vignobles du Cher (1969).

Les travaux les plus récents portent sur l'utilisation du nitrate ferrique en présence d'un agent capable de pénétrer dans les cellules de la plante : le diméthyl sulfoxyde, ou D. M. S. O., accompagne le sel de fer dans le végétal, ce qui donne à la méthode toute son originalité. Les premiers résultats obtenus par LAFON *et al.* (1967-1968) dans les vignobles de Charente, ceux de BADOUR (1970) en Champagne paraissent intéressants du fait qu'il y a reverdissement total des feuilles. Cependant, des mises au point très importantes restent à faire, car les risques de phytotoxicité sur différents cépages sont insuffisamment connus ; les périodes d'intervention à préférer sont à préciser.

## VI. — LE CUIVRE

6. 1. Constituant des divers enzymes d'oxydation, le cuivre est reconnu indispensable à la formation de la chlorophylle ; il participerait aussi à une fonction capitale comme la respiration.

(1) Citons cependant les résultats intéressants obtenus par DEMOLON et BASTISSE en étudiant des gels résultant de la coprécipitation de silice et de sels de fer.

A l'état normal, les tissus des arbres fruitiers en contiennent des quantités comprises entre 7 et 25 p.p.m. Mais certaines espèces, tel le Cerisier ou la Vigne, peuvent en accumuler de très fortes quantités.

Chez les plantes pérennes, la Vigne en particulier, l'aspect dynamique de l'absorption et de la migration dans le végétal de cet élément-trace paraît insuffisamment connu. Au cours du premier mois de l'activité végétative, et en l'absence de tout traitement cuprique, on observe une décroissance rapide des concentrations initiales de cet élément dans les feuilles d'Abricotier. A partir de valeurs comprises entre 15 et 20 p.p.m., on voit les teneurs s'abaisser jusqu'à 12 ou 8 p.p.m., dans le mois qui précède la maturité des fruits (fig. 4), (HUGUET *et al.*, 1969). Le rythme des processus métaboliques du cuivre rend compte de l'apparition tardive des symptômes de carence en cet élément sur les feuilles.

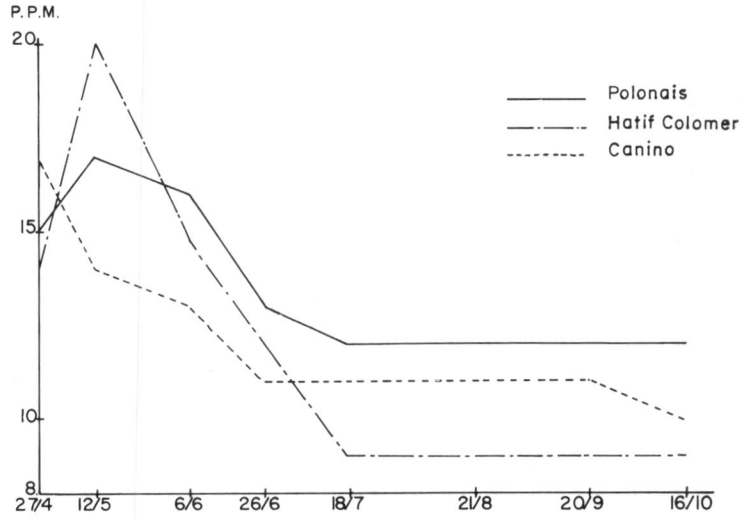



FIG. 4. — *Évolution du cuivre dans les feuilles de la base du rameau d'Abricotier.*
(Cu exprimé en p.p.m. de M. S.)

6. 2. En France, les déficiences cupriques des cultures pérennes constituent des cas isolés que l'on peut observer dans les sols acides et pauvres en matière organique. L'origine géologique du substrat a une influence notable sur les disponibilités de cet élément (article GOUNY, p. 620).

Le diagnostic d'une carence en cuivre repose sur l'analyse du végétal et l'examen des symptômes caractéristiques. On admet que les niveaux critiques en cuivre des feuilles des arbres fruitiers se situent au-dessous de 5 p.p.m.

GEOFFRION (1962) a parfaitement décrit les symptômes qu'il a observés sur les feuilles terminales des rameaux de l'année du Pommier. L'apparition de taches jaunes, brunâtres, progresse vers les feuilles du bas ; elle est suivie d'une chute de ces organes, tandis qu'une reprise de végétation temporaire des bourgeons axillaires, accompagne le dessèchement du bourgeon terminal.

On reconnaît la sensibilité particulière de certains porte-greffes du Pommier (EM II et XVI), ainsi que celle des variétés : *Reine des Reinettes, Golden Delicious, Reinette blanche du Canada, Cox's Orange.*

TROCMÉ (1964) rappelle aussi les atteintes par carence cuprique dont peuvent être l'objet le Poirier (*Cultivar Conférence*) et plus spécialement le Prunier.

Dans les vergers industriels, on pourrait redouter une extension des malnutritions cupriques, comme conséquence de l'utilisation exclusive de fongicides organiques ; mais pour des raisons de prévention à l'égard de certains parasites, la nécessité de l'emploi du cuivre dans les traitements se précise à nouveau. Les applications anticryptogamiques paraissent alors suffisantes à l'entretien de l'alimentation des arbres en cuivre.

6.3. On ne réservera qu'un exposé succinct aux phénomènes de toxicité du cuivre à l'égard des plantes pérennes ; le lecteur se reportera à l'article consacré à ce sujet (cf. JUSTE, p. 561-565).

Retenons simplement que l'accumulation du cuivre dans les sols acides des vergers de pêchers et des vignobles est la conséquence de son emploi répété, conjointement à celui du soufre, comme fongicide.

Les recherches entreprises à l'I. N. R. A. dès 1953 ont mis en évidence les mécanismes relevant de la dynamique de l'élément dans le sol qui président à l'apparition des accidents dans les cultures. Elles ont mis également l'accent sur le fait qu'en première génération, le système radiculaire des cultures pérennes se situe au-dessous de la couche d'accumulation du cuivre : les risques de toxicité demeurent alors réduits. Mais au cours des replantations successives, les techniques de travail du sol peuvent avoir des effets défavorables notables si elles déplacent en profondeur la couche de sol enrichie en cuivre, la mettant à la portée du système radiculaire récemment établi.

Les méthodes de correction actuellement préconisées, basées notamment sur le chaulage du sol apportent une solution à l'important problème de la toxicité du cuivre vis-à-vis des cultures pérennes, celles de la Vigne et des pêchers en particulier (cf. JUSTE, p. 564 ; DELAS et DARTIGUES, p. 607).

## VII. — LE ZINC

### 7. 1. *Rôle de l'élément dans la plante. Les phénomènes de carence*

Sans entrer dans le détail de ses fonctions, on peut indiquer l'intervention de cet élément dans le métabolisme des glucides et sa participation à la formation d'auxines, ce qui explique l'inhibition de la croissance végétale dans les cas d'un déficit d'alimentation zincique.

Un hectare de pommiers, produisant 40 tonnes, prélève environ 240 g de zinc au sol.

Chez les arbres fruitiers, comme chez la Vigne, en dehors du symptôme classique des « petites feuilles » en rosettes, les symptômes de carence se manifestent sur les feuilles par une chlorose qui peut être disposée assez régulièrement entre les nervures, laissant une assez large bande verte le long de chaque nervure (TROCMÉ, 1964 ; J. DELMAS, 1970).

Des carences en zinc ont été reconnues en France depuis 1949 (CHABANNES *et al.*, 1949 ; BARBIER *et al.*, 1950), sur pommiers, poiriers et cerisiers, en particulier

dans le Bassin Parisien et la moyenne vallée de la Loire, et dans les Pyréné (H. G. DELMAS, 1955). Elles se manifestent dans les terres légères, calcaires, enrichies en acide phosphorique. Cette dernière condition est réalisée dans les sols de Limagne, où la Station de Clermont-Ferrand a diagnostiqué une carence zincique sur pommier *Red Delicious* (1956).

Une mauvaise alimentation en zinc résulte de la combinaison des actions de plusieurs facteurs : une faible humidité du sol, des conditions de température et de luminosité élevées, ou la présence de vieille matière organique. Dans la région du Bas-Rhône, RUTTEN (1969) attribue les cas de carence en zinc sur pêchers à l'intensification des cultures, qui, pendant la période juvénile, explorent imparfaitement le sol.

### 7. 2. *Le diagnostic de la nutrition en zinc*

Le dosage du zinc dans le sol ne renseigne que de façon insuffisante sur les probabilités d'alimentation en zinc des arbres. Actuellement, le diagnostic d'un déficit zincique repose sur la détermination des teneurs de cet élément dans les feuilles ; le jugement formulé est confirmé par l'observation de réactions de la plante aux traitements. D'après les travaux de H. G. DELMAS, les feuilles de cerisiers malades contiennent 12 à 15 p.p.m. (M. S.) de zinc à la fin juin. Par ailleurs, des cerisiers établis sur terrasses schisteuses ne répondent pas de façon favorable aux apports de zinc sur les feuilles, dont les teneurs sont comprises entre 20 et 24 p.p.m. (M. S.) à la fin juin. Cette observation confirme les valeurs critiques indiquées précédemment. Chez les arbres fruitiers, il existe probablement des différences variétales quant à l'aptitude à absorber le zinc, comme on a pu le constater chez l'abricotier (fig. 5).

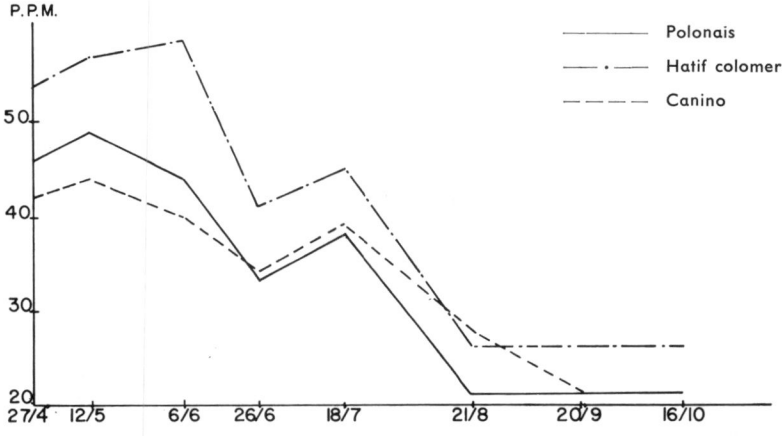



FIG. 5. — *Évolution du zinc dans les feuilles de la base du rameau d'Abricotier.*

### 7. 3. *Prévention et traitement de la carence zincique*

On a observé que les engrais verts et l'enherbement sont de nature à limiter les carences en zinc, bien que les mécanismes d'action de ces techniques n'aient pas été recherchés avec précision. Cependant, il est utile de souligner que les conditions des vergers ne sont pas toujours favorables à l'adaptation de ces types d'entretien du sol.

Même à dose élevée, l'application des sels de zinc au sol, sous forme de sulfate,

ne représente pas une opération très efficace, les difficultés tiennent à la faible assimilabilité des composés en sols alcalins et à leur mise en place au voisinage des racines.

Parmi les chélates dont on a préconisé l'utilisation, sous forme de Zn E. D. T. A., ou Zn H. E. E. D. T. A., il semble que l'irrégularité de leur action selon les types de sol ou les espèces limite leur emploi dans la pratique.

Les applications d'une solution de sulfate de zinc à 0,1 p. 100 sur frondaison, en début de végétation, représentent la meilleure technique visant à une rapidité d'action. Sur jeunes pêchers, RUTTEN (1969) obtient un redressement dans les quelques jours qui suivent le traitement.

Cependant, si l'on renouvelle systématiquement les deux traitements annuels préconisés habituellement, on peut observer, comme cela a été le cas sur cerisiers, des phénomènes de phytotoxicité dès la troisième année.

Malgré leur faible solubilité, les fongicides de synthèse du type zinèbe se montrent également efficaces dans la thérapeutique de guérison des malnutritions en zinc.

## VIII. — LE BORE

### 8. 1. *Importance du bore dans la plante. Son évolution*

On reconnaît à cet élément constitutionnel des rôles importants et variés dans la synthèse ou le transport des substances végétales élaborées : les sucres, les protéines, les pectines et les enzymes. En étroite relation avec d'autres éléments minéraux, le phosphore, le calcium et le potassium, le bore règle un certain nombre de processus métaboliques qui se déroulent dans les méristèmes et les organes de la reproduction : les fleurs, le pollen, les fruits.

Chez les arbres à pépins, la concentration en bore des organes en voie de développement est plus élevée que celle des tissus âgés (GOUNY et HUGUET, 1964) (tabl. 5). Cependant, après la récolte, dans les feuilles du Poirier et celles de l'Abricotier, on assiste à un nouvel enrichissement boraté de ces organes (fig. 6 et tabl. 5). Le rythme

TABLEAU 5

*Évolution du bore dans les organes du Poirier, p.p.m. matière sèche*
(GOUNY et HUGUET, 1964)

| Dates de prélèvements | 13-4 | 16-4 | 20-4 | 27-4 | 4-5 | 24-5 | 13-6 | 4-7 | 31-7 | 17-8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Stades phénologiques | $E_2$ | F | $F_2$ | G | I | | | | Récolte | |
| Fleurs | 106 | 93 | 82 | 86 | | | | | | |
| Fruits | | | | | 41 | 23 | 17 | 20 | 21 | |
| Feuilles | 96 | 77 | 67 | 62 | 44 | 32 | 34 | 39 | 42 | 53 |

du transfert de cet élément est très intense dans les bourgeons des arbres fruitiers au cours des stades phénologiques essentiels à la fructification (stades C à G de FLECKINGER). Pendant l'intervalle de temps qui sépare deux stades repères, les concentrations en bore varient très largement; de ce fait, le choix des bourgeons pour l'établissement d'un diagnostic de déficience des arbres s'avère très délicat.

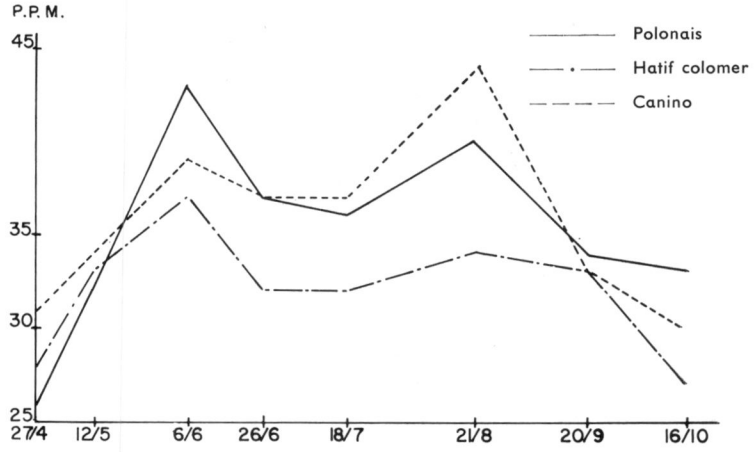



FIG. 6. — *Évolution du bore dans les feuilles de la base du rameau d'Abricotier.*

### 8. 2. *Les phénomènes de déficience en bore*

Le bore est l'oligo-élément dont la carence est la plus fréquente chez les plantes pérennes, ce qui tient à la nature de ces cultures.

Le Pommier et la Vigne ont été très souvent indiqués comme déficients en bore, sans que l'on affirme leur plus grande sensibilité à cette malnutrition, comparativement aux autres espèces pérennes. A notre avis, les possibilités d'apparition de ces accidents sont équivalentes sur des pommiers et des cerisiers installés dans les mêmes sols d'érosion granitique. Les sols de terrasses à cailloux roulés livrent insuffisamment le bore à la Vigne comme au Cerisier.

Les travaux français ont décrit très abondamment les symptômes caractéristiques perceptibles sur des sujets soumis à une alimentation boratée restreinte. Les signes anormaux décrits affectent la plupart des organes des arbres : les bourgeons, les fleurs, les fruits, les feuilles, les écorces ou les racines. Ce sont les organes normalement les plus riches en bore qui présentent les plus spectaculaires symptômes (DECAU, 1964). QUILLON (1966) en a dressé une liste exhaustive qu'il a complétée par un relevé des accidents estimés spécifiques aux cultivars du Pommier et du Poirier.

Selon BRANAS (1956), les divers cépages viticoles (Carignan, Chasselas, Gamay, Grenache) accusent des anomalies de la croissance et de la fructification qui se traduisent par des mérithalles courts, des feuilles épaisses et le millerandage des grappes. En outre, DECAU (1960) précise la très grande sensibilité de l'hybride producteur direct *S. V. 18.315*. J. DELMAS (1970) met l'accent sur la chronologie des symptômes et leur localisation sur les parties terminales des rameaux de la vigne ; observations qui éliminent toute confusion avec un déficit magnésien.

On retiendra aussi que les altérations des tissus sont déjà décelables à l'échelle cellulaire, aux abords des points végétatifs (QUILLON, 1966) ; elles précèdent les symptômes anormaux visibles au niveau des organes de la reproduction.

### 8. 3. *Le diagnostic de la nutrition boratée des plantes pérennes*

Il est souvent nécessaire de s'appuyer sur autre chose que l'observation des symptômes pour formuler un diagnostic : les caractères indiqués peuvent être communs à plusieurs maladies de nutrition (fente des bois, nécrose des fruits, prolifération des rameaux) ou même ils relèvent d'autres causes (nématodes, viroses, dégâts de traitements).

Les analyses de sols ou d'organes végétaux fournissent des informations particulièrement intéressantes à cet égard.

Un certain nombre de travaux ont pris comme critère de l'alimentation des plantes la teneur en bore soluble à l'eau des sols. Mais on sait que le flux des ions borates qui parviennent aux racines varie avec le taux d'humidité du sol (CORNILLON, 1967). La répartition des pluies et le volume des irrigations sont les facteurs actifs de la solubilisation de cet élément, tandis que la sécheresse abaisse la teneur en bore disponible. De ce fait, chez les cultures pérennes, on ignore si les exigences maximales reconnues aux stades de la floraison et de la fructification seront satisfaites. On a pu observer que les vergers de cerisiers établis en sol non irrigué réalisent des conditions particulièrement fluctuantes de leur alimentation boratée (HUGUET *et al.*, 1970) : selon les années, il n'y a pas concordance entre l'offre et la demande de la plante.

La composition des feuilles reflète les effets de tous les facteurs du milieu qui sont intervenus au cours de l'alimentation boratée des cultures. L'interprétation des analyses végétales demeure pourtant délicate : elle doit faire intervenir le développement des arbres, dont l'appréciation est difficile, ou celui des organes prélevés ; elle ne doit pas ignorer l'existence des interactions entre éléments. C'est ainsi que des applications élevées d'azote peuvent abaisser la teneur en bore des feuilles du Cerisier (tabl. 6) (HUGUET *et al.*, 1970). Inversement, une malnutrition d'un ou de plusieurs éléments autres que le bore accentue les symptômes particuliers des feuilles disposées en rosette chez le cerisier et maintient le bore à un faible taux dans ces organes.

TABLEAU 6

*Teneur en bore de feuilles de cerisiers en fonction des niveaux d'azote, p.p.m. matière sèche*

| Apport annuel d'azote kg/ha | 0 | 100 | 200 |
|---|---|---|---|
| Bore | 35 | 28 | 22 |

Dans la généralité des cas, chez les plantes pérennes, exemptes de symptômes particuliers, on estime normales les teneurs en bore des feuilles comprises entre 25 et 50 p.p.m. L'enquête du Groupe de Travail constitué par les Stations de l'I. N. R. A.

et les Laboratoires agronomiques spécialisés situe les teneurs convenables en bore des feuilles du Pommier *Golden* entre 17 et 70 p.p.m. : ces valeurs concernent les vergers dont on estime les rendements satisfaisants.

Quand les taux s'abaissent entre 20 et 9 p.p.m., les chances de voir apparaître les accidents de nutrition sont plus nombreuses.

Il est probable qu'il existe de multiples situations dans lesquelles le bore se trouve en quantité insuffisante pour permettre le développement optimum des cultures (DECAU, 1960).

Les corrections actuellement préconisées pour subvenir aux besoins en bore des plantes pérennes reposent sur deux types d'applications : au sol, sous forme de sels boratés, à des doses comprises entre 20 et 30 kg à l'hectare ; sous forme de solution, appliquée en pulvérisation sur frondaison. Cette dernière technique, à préférer, assure un échelonnement des apports, d'où une certaine concordance avec les besoins les plus intenses de la plante aux stades D, $F_2$ et I pour les arbres fruitiers, au dégagement de la grappe et à la véraison pour la vigne. On évitera cependant les applications excessives au sol : les excès de bore provoquent sur les rameaux et sur les feuilles, des symptômes analogues à ceux de la déficience (DECAU, 1964).

### 8. 4. *Relations entre la nutrition boratée et la qualité des fruits*

Dans la mesure où le manque de bore provoque sur les fruits des désordres au niveau de la cellule, on peut affirmer la participation de cet élément aux critères de la qualité des fruits.

C'est ainsi que GACHON (1963) a confirmé la présence de crevasses et de grisures liégeuses en forme d'étoile, sur *Reinette du Canada*, ce qui déprécie les qualités commerciales du fruit. De la même façon, VIEL (1960) corrige les dépressions liégeuses sur *Winter Banana*, *Belle de Boskoop* et *Reinette de Caux* par des applications boratées.

La plupart du temps, on attribue à un manque de bore les maladies désignées sous le terme général de « liège » ou taches spongieuses (« pit » ou « spot » des Anglo-Saxons) qui affectent les fruits à pépins. Plus récemment, on estime qu'un nombre limité de ces anomalies résulte d'une restriction de l'alimentation boratée des arbres. Une année sur cinq seulement, ces accidents ont pu être corrigés à l'aide d'apports boratés appliqués sur pommes rouges *Delicious* (HUGUET, 1967). Par contre, la régulation du rapport cationique K + Mg/Ca du fruit, obtenu en limitant les apports potassiques au sol et en pulvérisant des solutions de sels de calcium, maîtrise partiellement de tels risques d'accidents. On admet aussi que tout facteur influençant l'alimentation en eau des arbres peut être responsable des lésions citées.

### 8. 5. *Relations entre la nutrition boratée et l'état pathologique des cultures pérennes*

Un autre groupe d'études attribue au manque de bore diverses maladies qui affectent les arbres fruitiers : il s'agit de maladies à virus, d'atteintes bactériennes ou de maladies cryptogamiques. RIDÉ (1963) signale la prédominance des affections à *Pseudomonas Syringae* chez les arbres déficients en bore. On évoque également la fréquence des infections à *Monilia*, *Nectria*, *Glæosporium*, *Botrytis* ou *Stereum*, dans les vergers sous-alimentés en bore.

En fait, on peut se demander si les relations entre les maladies parasitaires et les carences en bore sont aussi étroites que l'indiquent les multiples observations citées : l'analogie des symptômes, tout au moins en ce qui concerne les maladies à virus, et la carence en bore, n'est-elle pas responsable des apparentements évoqués?

Sur le plan scientifique, il serait souhaitable que l'on conduise des expériences spécialement conçues en vue d'établir le bien-fondé des relations très souvent évoquées, sans ignorer toutefois qu'elles exigeraient également une maîtrise de tous les facteurs du milieu (nutrition et climat).

## CONCLUSION

Comme dans le cas des éléments majeurs, les programmes d'adaptation de la fourniture en oligo-éléments devraient tenir compte de la chronologie des besoins de la plante : elle se traduit par l'établissement de références sur la cinétique de l'absorption des différentes espèces ou variétés.

Mais le comportement de l'élément étudié doit être connu dans le milieu naturel où sont installés les vergers et les vignobles. A partir de ces observations locales, la méthode sera alors utilisable au niveau de l'exploitation.

On reconnaît actuellement que la faible mobilité des éléments cuivre, fer, zinc du sol et l'insuffisance de leur solubilité, ne garantissent pas toujours aux vergers et aux vignobles une bonne alimentation des cultures.

Les travaux sur les analyses des sols et des végétaux ont confirmé l'existence d'un certain nombre de cas de malnutrition en oligo-éléments, dont la présence est liée à des conditions particulières du milieu. Dans l'ensemble, la répartition des zones concernées ne représente pas de très grandes superficies.

Une exception cependant est relevée à l'encontre de la chlorose ferrique, et la fréquence de la carence boratée doit être notée dans les zones viticoles. On peut regretter pourtant qu'on ne dispose pas actuellement d'un inventaire plus complet des cas de déficience en éléments mineurs, ou tout au moins qu'un relevé des niveaux de l'alimentation des plantes pérennes n'ait pas été plus systématiquement réalisé.

Les techniques d'intervention, dans les cas graves, opèrent un redressement au niveau du sol ; mais de façon plus certaine, elles donnent la préférence aux apports des éléments reconnus déficients, effectués sur la partie aérienne du végétal. Cependant les applications annuelles systématiques des éléments-traces ne paraissent pas recommandables, si elles ne sont pas strictement contrôlées.

Les problèmes de l'alimentation des plantes pérennes en oligo-éléments ne se limitent pas à la prévention ou à la guérison des carences. Dans les cultures intensives, où l'on reconnaît une bonne potentialité des sols, on peut s'interroger sur la nécessité d'apporter périodiquement ces éléments indispensables à la culture, afin d'assurer la régularité de la qualité de la production. Cet objectif demande que l'on dispose, à l'échelle de chaque région, d'un certain nombre de vergers modèles, dans lesquels interviendraient entre autres l'irrigation, les cultures associées, ce qui permettrait à l'agronome de juger le bien-fondé de la généralisation de telles actions.

*Reçu pour publication en juin 1970.*

## SUMMARY

### TRACE ELEMENTS IN THE CULTIVATION OF TREES AND VINES

The special characteristics of the supply of perennial crops with trace elements are due to the physiological mechanisms of fruit trees and vines : periods of intensive growth of branches and roots, the storage of the elements in the tissues and their redistribution in the plant.

In orchards and vineyards, the specific techniques used, the pruning, and the upkeep of the soil through mixed cropping are equally responsible for the peculiarity of the nutrition of perennial plants.

In practice, the management of trace elements calls for a total evaluation of the annual amounts taken up by the different species. But the kinetics of absorption of each trace element into the plant constitute a valuable source of information for the programming of the rhythm of the supplies, if intervention proves necessary in the crops.

The diagnosis of deficiencies in trace elements calls for the grouping of specific visual symptoms found on plants, but more precisely for the analysis of the soil and plant-life.

Various methods of preventing and curing symptoms attributable to trace elements are demonstrated.

With intensive crops, showing no sign of deficiency, the need for periodic supplies of trace elements must be taken into account, in order to maintain the quality of the crops.



## ZUSAMMENFASSUNG

### DIE BEDEUTUNG DER SPURENELEMENTE FÜR OBSTBÄUME UND IM WEINBAU

Die originalen Eigenschaften der Versorgung mit Spurenelementen bei den Dauerkulturen stehen mit den physiologischen Mechanismen der Obstbäume und Rebstöcke im Zusammenhang : die Wachstumswellen der Zweige und der Wurzeln, das Aufbewahren der Elemente in den Geweben und deren Wiederverteilung in der Pflanze.

In den Obstgärten und Weinbergen beteiligen sich die angewandten, spezifischen Techniken, der Schnitt und die Unterhaltung des Bodens durch sich ergänzende Kulturen ebenfalls an der Originalität der Versorgung der Dauerpflanzen.

In der Praxis wählt man die Spurenelemente auf Grund von globalen Schätzungen betreffend die jährlichen Entnahmen der verschiedenen Sorten. Die kinetische Absorption jedes der Spurenelementen in der Pflanze bildet jedoch, im Falle dass Interventionen in den Kulturen notwendig erscheinen, eine für die Programmierung des Rythmus der Zufuhren nützliche Informationsquelle.

Die Diagnostik der ungenügenden Versorgung an Spurenelementen greift auf die Zusammenstellung der spezifischen visuellen auf den Pflanzen festgestellten Symptome, und mehr noch auf die Analyse des Bodens und der Pflanzen, zurück.

Die verschiedenen vorbeugenden und heilenden Methoden für die dem Mangel an Spurenelementen zugeschriebenen Krankheiten werden aufgeführt.

Bei intensiver Bodenbewirtschaftung und Abwesenheit von Mangelzeichen stellt sich ebenfalls das Problem periodischer Zufuhren an Spurenelemente mit dem Ziel, die Qualität der Erzeugung zu gewährleisten.



## РЕЗЮМЕ

*Микроелементы в садоводстве и виноградарстве.*

Клара ЮГЭ.

Оригинальность характера питания многолетних культур микроелементами зависит от физиологических механизмов фруктовых деревьев и виноградной лозы : периоды роста веток и корней, накопление запасов

элементов в тканях, перераспределение этих элементов в растении.

Применение специфических приемов культуры, обрезка, уход за почвой с помощью культур в междурядьях, увеличивают оригинальность этого питания в садах и виноградниках.

В практическом отношении применение микроелементов заставляет прибегать к общим оценкам годовых количеств элементов изъятых разными видами растений. Но кинетика поглощения каждого микроелемента в растении представляет также важный источник информации, годной для программировки ритмов подкормок, в случае если они окажутся необходимыми.

Диагностика недостаточностей в микроелементах прибегает к группировке внешних специфических симптомов появляющихся на растении, но чаще всего, и для большей точности, к анализу почвы и растения.

Автор указывает разные предохранительные и целительные методы инцидентов приписываемых микроелементам.

В интенсивных культурах, в отсутствии признаков недостаточности, встает также вопрос о периодических подкормках микроелементами, для обеспечения качества продукции.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BADOUR C., 1970. Essai de lutte contre la chlorose de la vigne en Champagne. *Compte rendu I. T.V.* Session 1970.

BARBIER G., CHABANNES J., TROCMÉ S., 1950. Sur un dépérissement de vergers aux environs d'Orléans. *C. R. Ac. Agric.*, 517-570.

BISSON J., 1970. Effets de pulvérisations foliaires sur la chlorose calcaire. *Compte rendu I. T. V.*, Session 1970.

BLANC-AICARD D., DROUINEAU G., 1955. Capacité de saturation en calcium des porte-greffes de la vigne et résistance à la chlorose calcaire. *C. R. Acad. Sci.*, **241**, 1614.

BOLLARD, 1957. Cité par P. J. KRAMER, T. T. KOZLOWSKI. *Physiology of trees.* McGraw-Hillbook company, New York.

BOUARD J., 1966. *Recherches physiologiques sur la vigne et en particulier sur l'aoûtement des sarments.* Thèse Bordeaux, 349 p.

BOUARD J., 1967. Variations de la teneur en glucides de la base des sarments de vigne au cours d'un cycle végétatif complet. *C. R. Acad. Sci.*, **264**, D, 1860-1862.

BRANAS J., BERNON G., 1956. La carence en bore dans le vignoble français. *Progr. agric. vitic.*, nos 43, 47, 49, 51 et 53..

BROSSIER J., 1965-1966. Compte rendu des travaux poursuivis à la Station de Recherches d'Arboriculture fruitière d'Angers, p. 12.

BUGNON F., BESSIS R., 1968. *Biologie de la vigne.* Masson & Cie, Paris, 157 p.

CARLES J., LATTES Fr., ALQUIER-BOUFFARD A., 1963. Des effets de la chlorose calcaire sur la répartition des acides organiques et des éléments minéraux, et de l'importance du pétiole dans cette répartition. *Bull. Soc. Franç. Physiol. vég.*, **9**, 165-174.

CHABANNES J., TROCMÉ S., BARBIER G., 1949. Observations sur la carence zincique du pommier. *C. R. Acad. Agric.*, 624-626.

CHABANNES J., DUPRAT A., TROCMÉ S., 1958. Observations sur le traitement de la chlorose des poiriers. *C. R. Acad. Agric.*, 46-50.

CHARTIER, 1969. Porte-greffes des espèces fruitières. *C. T. I. F. L.-Documents*, no 23, juillet, 5 p.

COPPENET M., 1968. Les oligo-éléments. *B. T.I.*, **231**, 595-608.

CORNILLON P., 1967. Observations sur les possibilités de solubilisation du bore dans le sol. *Sci. Sol*, **1**, 81-91.

DECAU J., 1960. Premières observations de carence en bore sur les terrasses de la moyenne Garonne, *C. R. Acad. Agric.*, 1002-1009.

DECAU J., 1964. Relations entre les conditions de milieu et les carences en bore. *Congrès Pomologique*, Nîmes, 84-100.

DELMAS H. G., 1955. Le dépérissement des cerisiers de la région de Céret. *C. R. Acad. Agric.*, 333-337.

DELMAS J., 1970. Fertilisation de la vigne (Traité d'ampélologie sous la direction de RIBEREAU-GAYON), (*sous presse*).

DEMOLON A., BASTISSE E. M., 1938. Complexes colloïdaux du fer et de l'alumine. *Ann. agron.*, 6-33.

DULAC J., 1964. Nouvelles sources d'information permettant d'apprécier l'alimentation minérale de la vigne. *Le contrôle de la nutrition minérale et de la fertilisation des cultures méditerranéennes*, Colloque de Montpellier, 192-196.

DROUINEAU G., 1943. Les formes du calcium dans les tissus végétaux atteints de chlorose spécifique des sols calcaires. *Sté Chimie biologique*, 25, **4**, 1336-1337.

DROUINEAU G., GOUNY P., 1946. Contribution à l'étude de la catalase des tissus foliaires. *Ann. agron.*, 35-50.

DROUINEAU G., GOUNY P., 1952. La mesure du pouvoir chlorosant des sols calcaires. *Bull. A. F. E. S.*, nº 29.

DROUINEAU G., 1963. La chlorose calcaire. *Bull. Sté fr. Physiol. végétale*, **9**, (4), 151-165.

GACHON L., 1963. Carence en bore sur pommier Reinette blanche du Canada. *Congrès Pomol.*, Bordeaux, 112-118.

GALET P., 1947. Résistance des porte-greffe à la chlorose. *Progr. agric. vitic.*, 128.

GARDNER V. R., BRADFOR F. C., HOOKER H. D., 1952. *The fundamentals of fruit production.* McGraw-Hillbook company, New York, 739 p.

GEOFFRION R., 1962. La carence en cuivre du pommier. *Phytoma*, Défence des cultures, nº 140, p. 15.

GOUNY P., MAZOYER R., 1951. Influence du carbonate de calcium sur la nutrition minérale de *Lupinus Albus*. *C. R. Acad. Sci.*, **233**, 1482.

GOUNY P., HUGUET C., 1964. Contribution à l'étude de la nutrition minérale des arbres fruitiers. *Ann. Phys. Vég.*, **6**, 33-37.

GUENNELON R., 1961. Évolution des techniques de lutte contre la chlorose. *Journées fruitières et maraîchères d'Avignon*, 73-86.

GUENNELON R., 1962. Les chélates de fer dans le traitement de la chlorose du poirier. *C. R. Acad. Agric.*, 209-213.

HÉNIN S., GRAS R., MONNIER G., 1960. *Le profil cultural.* S. E. I. A., Paris, 332 p.

HUGUET C., 1966. La nutrition du cerisier et ses problèmes. *Journée de la Cerise*, Pernes, 10-20.

HUGUET C., 1967. Relation entre le bitter-pit et la nutrition des arbres. *Journées Internationales des fruits et légumes*, Montpellier, 1-7.

HUGUET C., BONAFOUS M., DUCAILAR G., MEYNADIER I., 1969. Données récentes sur l'alimentation des abricotiers. *II*e *Journée de l'Abricotier*, Vaison-la-Romaine, 1-13.

HUGUET C., RICHARD M., BONAFOUS M., DUCAILAR G., 1970. Données récentes de l'alimentation du cerisier et la fertilisation des vergers. *Journées de la Cerise*, Lamalou-les-Bains, (*sous presse*).

JUSTE C., POUGET R., BRUZEAU F., 1967. Influence du pH et de l'anion bicarbonique sur l'absorption du fer par les racines de vigne. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **264**, 27-81.

LAFON J., COUILLAUD P., GAY-BELLILE F., LÉVY J. F., 1964. Rythme de l'absorption minérale de la vigne au cours d'un cycle végétatif. *Le contrôle de la nutrition minérale et de la fertilisation des cultures méditerranéennes*, Colloque de Montpellier, 213-217.

LAFON J., COMPAIN-METERAND A., 1970. Essai de lutte curative de la chlorose calcaire en milieu très chlorosant de grande Champagne à l'aide du nitrate de fer ferrique. *Compte rendu I. T.V.*, Session 1970.

LIWERANT J., 1960. Relations entre la chlorose des arbres fruitiers et la réaction des sols. *C. R. Acad. Agric.*, 352-358.

POUGET R., 1965. Perturbation de l'inhibition corrélative des bourgeons dans le genre *Vitis* sous l'action d'une carence en fer. *C. R. Acad. Sci., Paris*, **260**, 661-664.

POUGET R., JUSTE C., 1965. Influence de la chlorose ferrique sur la composition et les propriétés de la sève de la vigne. *C. R. Acad. Agric.*, 98-105.

QUILLON P. J., 1966. Les incidences du bore sur l'état sanitaire des vergers. 97e *Congrès Pomologique de Fr.*, Bourges, 135-158.

RIDÉ M., 1963. Quelques observations sur les bactérioses des rosacées fruitières. *Congrès Pomologique*, Bordeaux, 363-383.

TROCMÉ S., 1959. Les oligo-éléments dans la nutrition des arbres fruitiers. *Congrès Pomologique*, Florence-Ferrare, 203-208.

TROCMÉ S., 1964. Le zinc dans la nutrition et la fertilisation des arbres fruitiers. *Congrès Pomologique*, Nîmes, 75-83.

TROCMÉ S., 1966. Premiers résultats d'un essai sur l'entretien du sol en arboriculture fruitière. Action sur la nutrition des arbres. *Ann. agron.*, **17**, 1, 5-19.

VIEL G., 1960. Essais de lutte contre le liège des pommes. Service de la Protection des Végétaux, Rennes.

# RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

*Au début de chaque mémoire*, on indiquera : — *le titre du mémoire:* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

*Les mémoires* seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* suffisamment précis (250 mots max.) pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible; e) *discussion et conclusion;* f) *résumé* en anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons...; h) *références bibliographiques*.

*Les travaux originaux en anglais* doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

*Pour les autres documents* (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

*Les références bibliographiques* doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

*Pour les articles :* le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

*Pour les ouvrages :* le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

*Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies*, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée et porter les numéros des figures.

*Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils* seront envoyés *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 19 × 12,5 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

*Photographies :* Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

*Correction des épreuves* : les auteurs recevront une épreuve à corriger.

*Envoi du manuscrit :* M. Henin, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

*Le Directeur de la publication:* M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 2-1971

*Dépôt légal: 1er trimestre 1971. N° d'impression: 1635.*

# ANNALES
# AGRONOMIQUES

VOLUME 21 1970 NUMÉRO 6

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, PARIS-7e

*Ann. agron.*, 1970, **21** (6), 703-724.

# ISOTHERMES D'ÉCHANGE IONIQUE SUR LES SOLS ET RÉSEAUX DE CONCENTRATION

J.-P. ANDRÉ (1)

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches de Colmar*
*Institut national de la Recherche agronomique*

## RÉSUMÉ

Les phénomènes d'échange ionique dans les sols peuvent être décrits par certaines formules approchées. Ils peuvent être aussi représentés par des courbes expérimentales qui intègrent toutes les réactions secondaires, mais dont on ne connaît pas les équations.

C'est le cas, en particulier, des réseaux d'isothermes en diagramme carré qui conservent toute la symétrie de l'échange.

Cette note développe le principe de ce mode de représentation, ses propriétés, dont l'une est de permettre la prévision des équilibres des systèmes « sol-solution » au moyen d'une construction graphique originale, et enfin ses principales applications agronomiques.

## INTRODUCTION

L'étude de l'échange des ions, plus spécialement des cations, sur les constituants du sol s'est développée d'une part, en adaptant à ce cas particulier les lois semi-empiriques de l'adsorption établies pour les gaz par Freundlich et Langmuir, d'autre part, à partir des lois thermodynamiques des équilibres chimiques (Loi d'action de masse généralisée ) (EMSCHWILLER, 1951).

La première voie a conduit à des formules approchées (Wiegner-Jenny, Vageler) qui donnent la quantité adsorbée par unité de masse d'adsorbant, d'un cation A, participant à l'échange (I), en fonction de sa concentration dans la solution aqueuse en équilibre avec cet adsorbant.

$$\text{Sol} - \text{B} + \text{A} \leftrightharpoons \text{Sol} - \text{A} + \text{B} \qquad \text{(I)}$$

(1) Adresse actuelle : Station d'Agronomie, 63-Clermont-Ferrand.

Dans la suite, cette écriture sera remplacée par (II)

$$z_A\overline{B} + z_B A \leftrightharpoons z_B\overline{A} + z_A B \qquad \text{(II)}$$

en appelant $z_A$ et $z_B$ les valences des deux cations A et B et en convenant de surmonter d'un trait toutes les grandeurs (symboles, concentrations, fractions ioniques, etc.) relatives aux ions adsorbés.

Ces formules du type :

$$(\overline{A}) = f(A) \qquad \text{(III)}$$

nous renseignent sur l'un des deux ions participant à l'échange et sur un seul.

En revanche, les formules calquées sur la loi d'action de masse, de la forme :

$$(\overline{A})^{z_B} \cdot (B)^{z_A} = k \cdot (A)^{z_B} \cdot (\overline{B})^{z_A} \qquad \text{(IV)}$$

lient, à l'équilibre, les quantités des deux cations A et B présentes dans les deux phases solide et liquide ; elles soulignent les rôles symétriques de ces deux cations et de ces deux phases. Leur expression plus rationnelle a pour contrepartie qu'elles ne sont théoriquement valables que pour un couple d'ions : aussi leur application agronomique à l'étude de phénomènes qui mettent en général en jeu plus de deux espèces de cations demande des adaptations (formule de Gapon, par exemple) (Beckett, 1964 ; Rezk et Fathi Amer, 1969).

Les formules de ce type (IV) semblent le plus souvent utilisées pour dégager, des mesures expérimentales, un coefficient $k$ qui soit à la fois :

— caractéristique du comportement d'un sol donné vis-à-vis d'un couple de cations (Levy Hillel, 1968 ; Rezk et Fathi Amer, 1969),

— indépendant des conditions expérimentales, la température mise à part.

Or, ce coefficient n'est réellement une constante, à température donnée, que si les quantités $(\overline{A})$, (A), $(\overline{B})$, (B), sont les activités des ions dans les deux phases : $k$ est alors la constante thermodynamique de l'équilibre (Gaines et Thomas, 1953 ; Levy Hillel, 1968).

Mais si l'on introduit des concentrations, données plus accessibles que des activités, le coefficient $k$ (coefficient de sélectivité) varie en général en fonction de la composition de la solution et de la distribution des ions adsorbés (Helfferich, 1962).

Dans tous les cas, la détermination des coefficients numériques des formules (III) et (IV) implique l'étude expérimentale préalable de nombreux équilibres ioniques entre l'adsorbant étudié et des solutions de composition variée.

Il nous a semblé qu'une partie des informations portées par ces mesures préliminaires se perdait au cours des calculs ou, du moins, n'étaient plus susceptibles d'une exploitation simple et immédiate.

Nous nous proposons dans cette note d'exposer un mode de représentation graphique des échanges ioniques couramment utilisé pour les résines de synthèse (Helfferich, 1962), d'indiquer en détail la technique utilisée pour la construction des réseaux d'isothermes et de développer les propriétés et les applications de ces derniers.

Nous tirerons parti, en particulier, de ces propriétés pour expliquer certains résultats expérimentaux présentés dans notre premier mémoire (André, 1970).

## DÉFINITION DES ISOTHERMES D'ÉCHANGE DANS LA REPRÉSENTATION EN DIAGRAMME CARRÉ

### I. — *Généralités*

Soit un volume quelconque d'une solution aqueuse de deux cations A et B en équilibre ionique, à température constante, avec une masse quelconque d'un sol.

Si les ions sont des alcalins ou des alcalino-terreux, nous supposons que la solution est toujours à pH 7 et que les ions $H^+$ adsorbés sur le sol n'interviennent pas sensiblement dans l'échange. Cette hypothèse d'une capacité d'échange constante entièrement saturée par les ions A et B paraît valable dans les échanges $K^+$ — $Ca^{++}$ que nous avons étudiés.

Nous écartons dans cette étude le cas très important où l'un des cations est $H^+$.

Enfin, nous admettons ici que les anions de la solution n'ont pas d'influence propre sur l'échange.

### II. — *Définition des fractions ioniques*

Les fractions ioniques $x_A$ et $x_B$ des cations A et B dans la solution sont les rapports de leurs concentrations (équivalentes) respectives à la concentration totale (A + B).

De même, leurs fractions ioniques $\bar{x}_A$ et $\bar{x}_B$ dans la phase solide sont les rapports des quantités adsorbées de chacun à la capacité d'échange de la masse de sol en équilibre avec la solution. Ces grandeurs sont des nombres sans dimensions et sont comprises toutes les quatre entre 0 et 1 :

$$\boxed{x_A + x_B = 1 \text{ et } \bar{x}_A + \bar{x}_B = 1} \qquad (V)$$

Nous aurons très sensiblement :

$$\boxed{\begin{aligned} \bar{x}_A &= 0, \text{ quand } x_A = 0 \\ \bar{x}_A &= 1, \text{ quand } x_A = 1 \end{aligned}} \qquad (VI)$$

### III. — *Surface isotherme. Réseau d'isothermes*

La fraction $\bar{x}_A$ (ou $\bar{x}_B$) suffit à déterminer la distribution des ions dans la phase solide de C. E. C. constante désignée par $\bar{C}$. La solution, elle, doit être définie par $x_A$ (ou $x_B$) et par sa concentration totale C.

Tous les équilibres ioniques possibles entre ces deux phases, à température constante, sont définis par une valeur particulière des trois variables liées ($\bar{x}_A$, $x_A$, C). Dans ces coordonnées, les équilibres sont représentés par les points d'une surface à une nappe (GAINES et THOMAS, 1953) (fig. 1).

La projection sur le plan ($\bar{x}_A$, $x_A$) des courbes-intersections de cette surface et de plans parallèles à ($\bar{x}_A$, $x_A$) correspondant à des concentrations $C_1$, $C_2$, $C_3$..., constitue un *réseau d'isothermes de concentration.*

Un tel réseau est caractéristique d'un sol, de deux cations et d'une température donnés. Il est constitué d'un nombre quelconque de courbes isothermes caractéristiques chacune d'une concentration totale donnée. Les relations (V) entraînent que tout le réseau est enfermé dans un carré.

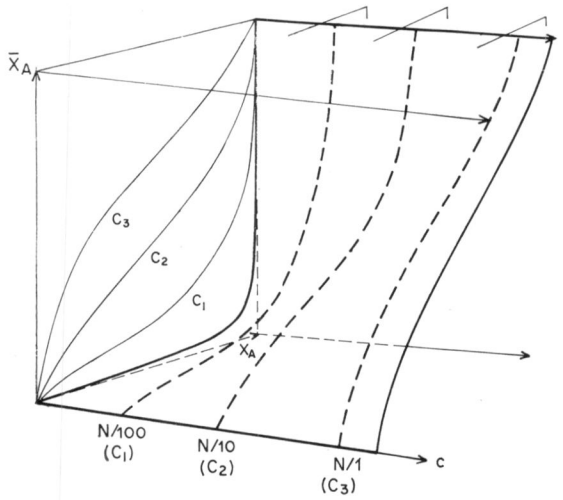



FIG. 1. — *Dans les coordonnées $\bar{x}_A$, $x_A$, C, les points d'équilibre ionique à température constante entre les deux phases se placent sur une surface : à l'équilibre, deux des coordonnées déterminent la troisième*

*Quand l'équilibre est atteint,* on peut sans le déplacer retirer une quantité quelconque de l'une des phases. En effet, on a alors :

$$z_B \bar{\mu}_A + z_A \mu_B = z_A \bar{\mu}_B + z_B + z_B \mu_A \qquad \text{(VII)}$$

*Remarque.*

Un point de l'espace situé hors de la surface peut aussi se projeter dans le carré. Il représente alors un état hors d'équilibre d'un système sol-solution : l'état *initial* d'une suspension d'un sol saturé d'ions $Ca^{++}$ dans une solution d'un sel de potassium est un exemple d'un tel état, défini par ($\bar{x}_K = 0$, $x_K = 1$).

## PROPRIÉTÉS DES ISOTHERMES D'ÉCHANGE D'UN RÉSEAU DE CONCENTRATION DANS LE DIAGRAMME CARRÉ

Soit un système sol-solution hors d'équilibre défini par le point o ($\bar{x}_0$, $x_0$) et satisfaisant aux conditions énoncées dans les généralités.

Soit M la masse du sol, $\bar{C}$ sa capacité d'échange (exprimée en méq/100 g), V le volume de la solution, C sa concentration totale en cations A et B (exprimée en méq/l).

Ce système est le siège d'une réaction d'échange et atteint un état d'équilibre

dont le point représentatif E ($\bar{x}_E$, $x_E$) est placé sur l'isotherme associée à la concentration C (restée constante au cours de l'échange) (fig. 2).

## I. — *Représentation graphique de la réaction d'échange*

Soit o′ ($\bar{x}_0 - \delta\,\bar{x}_0$, $x_0 + \delta\,x_0$) représentant un état voisin de l'état o, occupé par le système au cours de la réaction d'échange.

Si $\delta(\overline{A})$, $\delta(A)$, $\delta(\overline{B})$, $\delta(B)$ sont les variations des quantités (en méq) des ions A et B présentes dans les deux phases entre o et o′,

$$| \delta(\overline{A}) | = | \delta(A) | = | \delta(\overline{B}) | = | \delta(B) | \qquad \text{(VIII)}$$

$$\delta(\bar{x}_0) = \frac{| \delta(\overline{A}) |}{(\overline{A} + \overline{B})} \; ; \; \delta x_0 = \frac{| \delta(A) |}{(A + B)} \qquad \text{(IX)}$$

$$\text{et} \quad \frac{\delta(\bar{x}_0)}{\delta(x_0)} = \frac{(A + B)}{(\overline{A} + \overline{B})} = \frac{C \cdot V}{\overline{C} \cdot M} = \text{constante} \qquad \text{(X)}$$

On montre de même que le rapport des variations $\Delta\bar{x}$ et $\Delta x$ entre O et E a la même valeur constante. Les trois points O, O′ et E sont alignés.

Donc le point représentatif du système entre l'état initial et l'état d'équilibre final décrit une droite de pente égale à $-\dfrac{V}{M}\dfrac{C}{\overline{C}}$ (fig. 2).

$$\boxed{\operatorname{tg} \alpha = -\frac{V \cdot C}{M \cdot \overline{C}}} \qquad \text{(XI)}$$

*Conséquence.*

Si on dispose d'un réseau d'isothermes, on peut, connaissant l'état initial du système défini par (M, $\overline{C}$, $\bar{x}_0$, V, C, $x_0$) déterminer aisément les coordonnées de son point d'équilibre.

Cette propriété importante du réseau contient implicitement la suivante :

A l'équilibre, les grandeurs $\bar{x}_A$ et $x_A$ sont liées de façon biunivoque : l'état de saturation du sol détermine la composition de la solution et réciproquement.

## II. — *Applications théoriques de ces propriétés à des problèmes agronomiques*

Dans ce chapitre, les applications proposées sont qualifiées de théoriques dans la mesure où elles correspondent à des cas simples qui ne mettent rigoureusement en jeu que deux espèces de cations.

Nous donnons plus loin nos résultats expérimentaux.

Nous désignerons par le terme « système » le mélange sol-solution, que ce soit une suspension ou une terre humide, donc quel que soit le rapport M/V et nous envisageons les cas suivants :

*Premier cas :* $\boxed{\text{sol sec} + \text{solution} \rightarrow \text{système}}$ (XII)

L'état initial O est défini par (M, $\overline{C}$, $\overline{x}_A$), et (V, C, $x_A$). La figure 2 illustre la construction graphique qui permet de déterminer le point d'équilibre E. La pente de la droite OE est calculée par la formule (XI).

En O, le système est hors d'équilibre ; en E, il est à l'équilibre.

*Deuxième cas :* système 1 + solution → système 2 (XIII)

Notons, pour rester dans le cas le plus général, que la solution ajoutée au système I peut avoir une concentration C comprise entre 0 et l'infini : ce peut donc

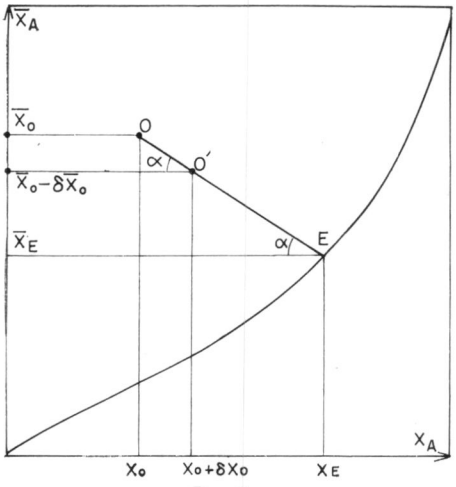



Fig. 2

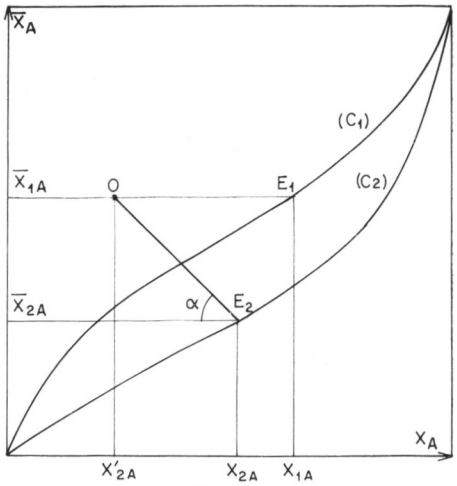



Fig. 3

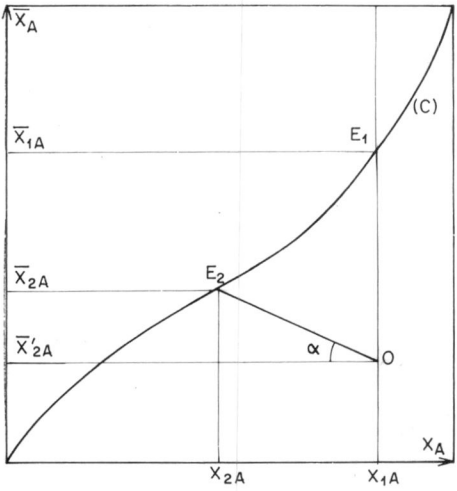



Fig. 4

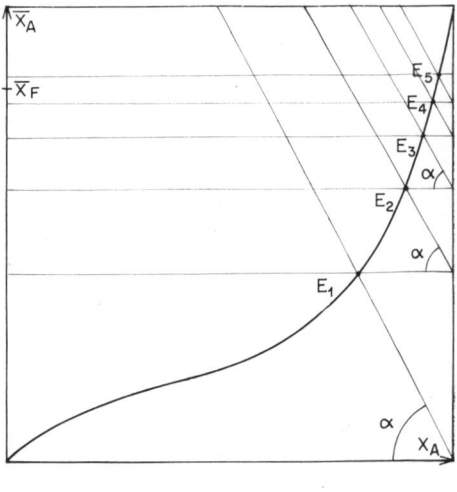



Fig. 5

FIG. 2, 3, 4, 5. — *Principe de la détermination graphique des points d'équilibre ionique E de différents systèmes sol-solution*

Dans la fig. 5 qui représente une extraction avec reprises on voit qu'il faut en tout 5 extractions successives du cation B par le cation A pour atteindre une valeur $\overline{x}_F$ donnée à l'avance

être aussi de l'eau pure ou un sel sec (ou un mélange de sels). Les phénomènes d'échange provoqués par la fertilisation et l'irrigation entrent dans ce cas.

Le système 1 est défini à l'équilibre au point $E_1$ par $(M, \overline{C}, \bar{x}_{1A}, V_1, C_1, x_{1A})$.

La solution ajoutée l'est par $(V', C', x'_A)$.

L'état initial du système 2 au point O le sera par : $(M, \overline{C}, \bar{x}_{1A}, V_2, C_2, x'_{2A})$.

$$\text{(1)} \quad \boxed{\begin{aligned} C_2\,(V_1 + V') &= C_1\,V_1 + C'\,V' = C_2\,V_2 \\ x'_{2A}\,(V_1\,C_1 + V'\,C') &= x_{1A}\,V_1\,C_1 + x'_A\,V'\,C' \end{aligned}} \qquad \text{(XIV)}$$

On détermine le point d'équilibre $E_2$ du système 2 comme l'intersection de l'isotherme correspondant à $C_2$ et de la droite passant par O, de pente $\operatorname{tg}\alpha = -\dfrac{C_2 \cdot V_2}{M \cdot \overline{C}}$ (fig. 3).

*Troisième cas :* système 1 + sol sec → système 2

Le sol sec est de même nature que celui du système 1 ou du moins son réseau d'isothermes relatif aux ions A et B doit en être très voisin.

On raisonne comme précédemment en définissant le système 1 par $(M_1, \overline{C}_1, \bar{x}_{1A}, V, C, x_{1A})$, le sol ajouté (par $M', \overline{C}', \bar{x}'_A$) et l'état initial O du système 2 par $(M_2, \overline{C}_2, \bar{x}'_{2A}, V, C, x_{1A})$

avec

$$\boxed{\begin{aligned} \overline{C}_2\,(M_1 + M') &= \overline{C}_1\,M_1 + \overline{C}'\,M' = \overline{C}_2\,M_2 \\ \bar{x}_{2A}\,(M_1\,\overline{C}_1 + M'\,\overline{C}') &= \bar{x}_{1A}\,M_1\,\overline{C}_1 + \bar{x}_A'\,M'\,\overline{C}' \end{aligned}} \qquad \text{(XV)}$$

Les points $E_1$ et $E_2$ d'équilibre des deux systèmes sont sur la même isotherme (comme l'indique la figure 4.)

*Quatrième cas :* système 1 + système 2 → système 3

On définit de même l'état initial du nouveau système, en se servant des relations (XIV) et (XV).

Nous avons étudié un cas particulier de ce type, tel que les systèmes 1 et 2 ne contiennent respectivement que l'ion K et l'ion Ca.

*Cinquième cas.*

Il s'agit du processus d'extraction avec reprises successives :

| | | |
|---|---|---|
| (Mise en susp.) | Sol sec + solution 1 | → système 1 |
| (filtration) | système 1 | → système 2 + solution (éliminée) |
| (Remise en susp.) | système 2 + solution 1 | → système 3 |
| (filtration) | système 3 | → système 4 + solution (éliminée) |
| (Remise en susp.) | système 4 + solution 1 | → système 5, etc. |

(1) Cette relation exprime simplement que la quantité d'ions A en solution au point o est égale à la somme des quantités de A dans la phase liquide du système 1 et dans la solution ajoutée.

La figure 5 illustre cette opération dans le cas où l'on néglige la solution retenue par le sol après la filtration. Elle montre que l'on peut déterminer le nombre d'opérations à effectuer pour atteindre un niveau d'extraction $\bar{x}_F$ donné à l'avance.

*Remarque.*

L'extraction par percolation continue ne peut être traitée que par la résolution de systèmes complexes d'équations différentielles (HELFFERICH, 1962) mais on peut rattacher cette opération au cinquième cas, d'une manière approximative, en l'assimilant à une succession d'états d'équilibre entre des tranches fictives de solution, mises les unes après les autres en contact avec des couches contiguës fictives de sol et en négligeant les phénomènes de diffusion.

## MÉTHODES EXPÉRIMENTALES ET MATÉRIEL UTILISÉ

### (ÉTABLISSEMENT DES ISOTHERMES D'ÉCHANGE) (RÉSEAU DE CONCENTRATION)

#### I. — *Préliminaire*

La technique indiquée est celle que nous avons mise au point pour l'étude de l'échange des cations K et Ca sur les trois sols régionaux suivants :

— alluvions rhénanes sablo-limoneuses à 29 p. 100 de calcaire et d'une C. E. C. de 4,3 méq/100 g, de Nambsheim (sol N) ;

— alluvions granitiques vosgiennes, non calcaires, d'une C. E. C. de 10,3 méq/100 g, de Wintzenheim (sol W) ;

— sol lœssique limoneux à 18 p. 100 de calcaire et d'une C. E. C. de 13,4 méq/100 g du lieu-dit « Huben » (sol H).

Le second sol provient d'une vigne de la station de viticulture de Colmar, le troisième du domaine du Centre de Recherches de Colmar.

Ces sols ont été mis à l'équilibre, à température ambiante, (21-23°C) avec des solutions de chlorures de potassium et de calcium, de composition définies par :

$$x_K = 0{,}2 — 0{,}4 — 0{,}6 — 0{,}8$$

et de concentration totales 1N, N/10, N/100.

Le tracé de chacune des trois isothermes du réseau est donc défini par 6 points, en comptant les deux extrémités ($x_K = \bar{x}_K = 0$) et ($x_K = \bar{x}_K = 1$). Pour le sol N, des points supplémentaires ont été ajoutés dans les intervalles ($0 < x_K < 0{,}2$) et ($0{,}8 < x_K < 1$).

Les limites de concentration 1N et N/100 ont été choisies pour les raisons agronomiques suivantes :

— la limite supérieure est de l'ordre de grandeur des solutions saturées qui pénètrent dans le sol aux points où se dissolvent les engrais épandus.

C'est aussi la concentration d'une solution KCl expérimentée dans un travail antérieur (ANDRÉ, 1970) dont nous reprenons ici les conclusions,

— la limite inférieure correspond à l'ordre de grandeur de la concentration cationique totale des solutions du sol.

Entre ces deux limites, nous avons intercalé une concentration moyenne N/10 qui facilite l'interpolation.

#### II. — *Préparation des sols*

Les sols calcaires sont préalablement décalcarifiés. Nous utilisons en effet une solution normale d'acétate d'ammonium pour l'extraction des cations K et Ca échangeables et nous avons constaté qu'elle dissout le calcaire à raison de 16 à 18 méq/l $Ca^{++}$ pendant la percolation.

Les sols sont traités en suspension dans l'eau par HCl concentré ajouté par petites portions. Une agitation rotative assure une réaction rapide.

La fraction fine du sol, décalcarifiée la première est décantée et filtrée sur Büchner. La fraction grossière y est jointe quand l'effervescence est terminée.

L'ensemble est lavé abondamment sur filtre par une solution normale de $CaCl_2$, puis à l'eau permutée jusqu'à ce que le filtrat ait une concentration inférieure à 1 méq/l Ca, puis séché à 50°, tamisé à 1 mm et homogénéisé.

Le sol non calcaire est simplement saturé par $Ca^{++}$, puis traité comme les précédents.

### III. — *Détermination des points d'équilibre*

Cette opération comporte trois phases :

la mise en équilibre du sol et de la solution,
le contrôle de l'équilibre,
la détermination de $x_K$ et $\bar{x}_K$.

Les difficultés rencontrées sont un peu différentes selon la concentration C.

a) *Cas de l'isotherme N/10.*

1. *Mise en équilibre* : des prises de 10 g de sol sont placées dans des tubes à percolation tarés, et lavés par 200 ml de chaque solution.

2. *Contrôle* : l'équilibre (distribution des cations adsorbés) n'est pas sensiblement différent, lorsqu'on fait passer un volume double de solution.

3. La solution imbibant les sols à la fin de la percolation est extraite en majeure partie par ressuyage forcé à la trompe à vide. Ce qui en reste est mesuré par la pesée des tubes.

Tous les cations présents dans les tubes sont alors extraits par la percolation de 200 ml d'acétate d'ammonium normal. Des quantités ($\overline{K}$ + K′) et ($\overline{Ca}$ + Ca′) de potassium et de calcium dosées au photomètre à flamme dans les percolats sont retranchées les quantités K′ et Ca′ calculées à partir du poids et de la composition de la solution résiduelle : on obtient $\overline{K}$ et $\overline{Ca}$. On vérifie que tous les totaux ($\overline{Ca}$ + $\overline{K}$) sont égaux à la C. E. C. connue des échantillons de sol. On calcule $\bar{x}_K$.

(Les résultats numériques sont consignés dans le tableau 1.)

TABLEAU I

*Équilibres ioniques entre les sols H, W, N, et des solutions N/10 de calcium et potassium de composition $x_K$ = 0,2, 0,4, 0,6, 0,8.*
*Chaque équilibre est défini par le couple ($\bar{x}_K$, $x_K$).*

Isotherme K, Ca, N/10

| | H | | | | W | | | | N | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $x_K$ | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 |
| $\overline{K}$ + K′ | 0,420 | 0,630 | 0,850 | 1,100 | 0,215 | 0,340 | 0,460 | 0,585 | 0,160 | 0,270 | 0,390 | 0,510 |
| $\overline{Ca}$ + Ca′ | 1,380 | 1,170 | 0,945 | 0,685 | 1,135 | 1,020 | 0,885 | 0,685 | 0,570 | 0,457 | 0,336 | 0,230 |
| K′ | 0,057 | 0,110 | 0,173 | 0,223 | 0,038 | 0,075 | 0,119 | 0,147 | 0,034 | 0,067 | 0,105 | 0,137 |
| Ca′ | 0,228 | 0,165 | 0,115 | 0,055 | 0,152 | 0,113 | 0,079 | 0,037 | 0,136 | 0,102 | 0,070 | 0,034 |
| $\overline{K}$ | 0,363 | 0,520 | 0,677 | 0,877 | 0,177 | 0,265 | 0,341 | 0,438 | 0,126 | 0,203 | 0,285 | 0,373 |
| $\overline{Ca}$ | 1,152 | 1,005 | 0,830 | 0,630 | 0,983 | 0,907 | 0,806 | 0,648 | 0,434 | 0,355 | 0,266 | 0,196 |
| $\overline{K}$ + $\overline{Ca}$ | 1,515 | 1,525 | 1,507 | 1,507 | 1,160 | 1,172 | 1,147 | 1,086 | 0,560 | 0,558 | 0,551 | 0,569 |
| $\bar{x}_K$ | 0,24 | 0,34 | 0,45 | 0,59 | 0,155 | 0,225 | 0,30 | 0,40 | 0,225 | 0,365 | 0,52 | 0,655 |

b) *Cas de l'isotherme N/100.*

1. *Mise en équilibre* : cette opération nécessite un volume de solution plus important. La percolation est remplacée par une mise à l'équilibre des sols (10 g) en suspension dans trois volumes successifs de 1 litre de solution.

2. *Contrôle* : les sols avaient été, avant cet équilibre, saturés par $Na^+$ par la percolation de 250 ml d'une solution NaCl normale. L'équilibre K-Ca est jugé atteint quand la dernière suspension (solution et sol) ne contient plus que des traces de cet ion témoin.

3. *Mesure de* $\bar{x}_K$ : ces sols décantés sont traités par l'acétate d'ammonium comme précédemment. La correction à faire est, cette fois, négligeable.

TABLEAU 2

*Équilibres ioniques entre les sols H, W, N et des solutions N/100 de calcium et potassium de composition* $x_K = 0{,}2,\ 0{,}4,\ 0{,}6,\ 0{,}8$.
*Chaque équilibre est défini par le couple* $(\bar{x}_K,\ x_K)$.

Isotherme K, Ca, N/100

| | H | | | | W | | | | N | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $x_K$ | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 |
| $\overline{Na}$ | $\sim$ 0,01 | | | | $\sim$ 0,01 | | | | $\sim$ 0,01 | | | |
| $\overline{K}$ | 0,19 | 0,31 | 0,39 | 0,56 | 0,08 | 0,16 | 0,18 | 0,30 | 0,065 | 0,118 | 0,170 | 0,240 |
| $\overline{Ca}$ | 1,24 | 1,06 | 0,90 | 0,87 | 0,93 | 0,85 | 0,70 | 0,64 | 0,610 | 0,540 | 0,474 | 0,348 |
| $\overline{K} + \overline{Ca}$ | 1,43 | 1,37 | 1,29 | 1,43 | 1,01 | 1,01 | 0,88 | 0,94 | 0,675 | 0,66 | 0,644 | 0,59 |
| $\bar{x}_K$ | 0,135 | 0,235 | 0,30 | 0,39 | 0,08 | 0,16 | 0,21 | 0,32 | 0,10 | 0,18 | 0,26 | 0,40 |

c) *Cas de l'isotherme 1 N.*

La concentration élevée des solutions peut être une source d'erreurs. La technique a été modifiée en conséquence :

1. *Mise à l'équilibre* : on a fait percoler 50 ml de chaque solution sur les échantillons de sol, préalablement mis en suspension pendant plusieurs heures dans 25 ml des mêmes solutions.

Le sol H de texture fine a été pris tel quel ; les sols W et N ont été débarrassés de leur fraction grossière de façon à augmenter leur C. E. C.

2. *Contrôle* : la solution d'imbibition est extraite par une centrifugation à 5 000 *g* durant une heure : les sols sont placés dans un double tube (fig. 6) qui permet de recueillir la solution extraite en vue d'une analyse : nous avons vérifié que la composition de cette solution ($x_{K_E}$) n'est pas différente de la composition initiale ($x_{K_0}$), et nous avons admis qu'il en est de même pour le résidu encore retenu par le sol.

D'autre part, le système du double tube permet de s'assurer par pesée qu'il n'y a pas eu d'évaporation sensible pendant l'extraction.

Le poids de la solution résiduelle est mesuré avec précision et l'on en déduit les quantités K′ et Ca′ d'ions $K^+$ et $Ca^{++}$ qu'elle contient.

3. *Mesure de* $\bar{x}_K$ : après ces opérations, les sols sont lavés successivement :

— avec 200 ml d'eau permutée qui extraient, *tout en déplaçant l'équilibre*, les quantités K″ et Ca″. Nous vérifions que $(K' + Ca') \cong (K'' + Ca'')$.

— avec 200 ml de solution normale d'acétate d'ammonium qui extraient les quantités $\overline{K}'$ et $\overline{Ca}'$ de cations échangeables. Les quantités $\overline{K}$ et $\overline{Ca}$ de cations échangeables *à l'équilibre primitif*, sont calculées comme suit :

$$\overline{K} = \overline{K}' + (K'' - K')$$
$$\overline{Ca} = \overline{Ca}' - (Ca' - Ca'')$$

en posant que $(\overline{K} + \overline{Ca}) = (\overline{K}' + \overline{Ca}')$ ou, en d'autres termes, que le lavage à l'eau n'a pas provoqué une hydrolyse sensible.

On calcule $\bar{x}_K$ à partir de $\overline{K}$ et $\overline{Ca}$ (les mesures sont rassemblées dans le tableau 3).

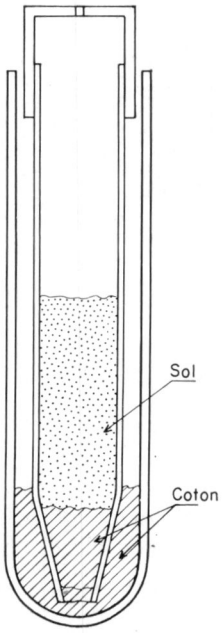



FIG. 6. — *Double tube pour l'extraction par centrifugation de la solution retenue par les échantillons de sol à l'équilibre ionique*

TABLEAU 3

*Équilibres ioniques entre les sols H, W, N et des solutions 1N de calcium et potassium de composition* $x_K = 0{,}2,\ 0{,}4,\ 0{,}5,\ 0{,}6,\ 0{,}8$.
*Chaque équilibre est défini par le couple* $(x_K,\ x_K)$.

Isotherme K, Ca, 1 N

| | H | | | | W | | | | N | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $x_{Ko}$ | 0,20 | 0,40 | 0,5 | 0,8 | 0,2 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 0,20 | 0,40 | 0,60 | 0,80 |
| $xK_E$ | 0,20 | 0,395 | 0,495 | 0,79 | 0,205 | 0,505 | 0,595 | 0,795 | 0,20 | 0,40 | 0,595 | 0,80 |
| K″ | 0,53 | 0,80 | 0,82 | 1,20 | 0,50 | 0,86 | 1,30 | 1,28 | 0,51 | 0,85 | 0,92 | 1,18 |
| Ca″ | 0,605 | 0,35 | 0,26 | 0,064 | 0,78 | 0,38 | 0,31 | 0,05 | 0,83 | 0,56 | 0,26 | 0,09 |
| (K″ + Ca″) | 1,135 | 1,15 | 1,08 | 1,264 | 1,28 | 1,24 | 1,61 | 1,33 | 1,34 | 1,41 | 1,18 | 1,27 |
| K′ | 0,265 | 0,495 | 0,51 | 1,015 | 0,260 | 0,615 | 0,96 | 1,05 | 0,26 | 0,55 | 0,745 | 0,25 |
| Ca′ | 1,065 | 0,745 | 0,51 | 0,255 | 1,05 | 0,615 | 0,64 | 0,26 | 1,05 | 0,83 | 0,495 | 1,01 |
| (K′ + Ca′) | 1,33 | 1,24 | 1,02 | 1,27 | 1,31 | 1,23 | 1,60 | 1,31 | 1,31 | 1,38 | 1,24 | 1,26 |
| $\overline{K}'$ | 0,39 | 0,60 | 0,69 | 0,91 | 0,22 | 0,465 | 0,48 | 0,68 | 0,27 | 0,44 | 0,69 | 0,81 |
| $\overline{Ca}'$ | 1,17 | 1,08 | 0,71 | 0,63 | 1,56 | 1,18 | 1,31 | 1,10 | 0,93 | 0,735 | 0,55 | 0,37 |
| $\overline{K}$ | 0,69 | 0,94 | 0,97 | 1,095 | 0,465 | 0,705 | 0,805 | 0,90 | 0,51 | 0,725 | 0,90 | 0,975 |
| $\overline{Ca}$ | 0,87 | 0,74 | 0,43 | 0,445 | 1,315 | 0,94 | 0,985 | 0,88 | 0,69 | 0,45 | 0,34 | 0,205 |
| $(\overline{K} + \overline{Ca})$ | 1,56 | 1,68 | 1,40 | 1,54 | 1,78 | 1,64 | 1,79 | 1,78 | 1,20 | 1,175 | 1,24 | 1,18 |
| $\overline{x}_K$ | 0,44 | 0,56 | 0,69 | 0,71 | 0,26 | 0,43 | 0,45 | 0,505 | 0,425 | 0,615 | 0,725 | 0,825 |

— IV —

Nous avons également appliqué à l'étude de ces équilibres (mais seulement pour les isothermes N/10 et N/100 du sol N) la technique suivante schématisée dans le « cinquième cas » du chapitre précédent.

a) *Isotherme N/10.*

200 g de la fraction fine du sol, décalcarifiée et saturée d'ions Ca (C. E. C. = 23 méq) sont mis en suspension dans 400 ml d'une solution N/10 de $CaCl_2$.

A partir de cet état, nous effectuons 5 fois de suite le cycle suivant :

— agitation durant trois heures,
— décantation,
— prélèvement de 100 ml de solution claire pour le dosage de K et Ca,
— recomplément à 400 ml avec 100 ml de solution N/10 de KCl.

b) *Isotherme N/100.*

50 g de la même fraction de ce sol sont mis en suspension dans 1 000 ml de solution N/100 de $CaCl_2$.

Le processus est le même, mais le prélèvement est de 250 ml et nous recomplétons avec un volume égal de solution N/100 de KCl.

c) *Méthode de calcul.*

Nous avons en tout 6 états d'équilibre numérotés de 0 à 5 (tabl. 4 et 5).

L'analyse de la solution nous permet de connaître constamment la distribution de K et Ca dans les deux phases « sol » et « solution ».

Au « nième » équilibre, les quantités (en méq) d'ions K et Ca adsorbées sur le sol sont données par les relations :

$$\overline{K}_{E_n} = \sum_{i=1}^{i=n} (K_O - K_E)_i$$

$$\overline{Ca}_{E_n} = \overline{Ca}_{E_O} - \sum_{i=1}^{i=n} (Ca_E - Ca_O)_i$$

TABLEAU 4

*Suite d'équilibres ioniques entre le sol « N » et des solutions N/10 de potassium et de calcium* (extractions successives de Ca).

Isotherme N/10

| Numéro de l'équilibre | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| État initial du système | | | | | | |
| $K_o$ | | 10 | 14,8 | 19,0 | 28,4 | 32,2 |
| $Ca_o$ | | 30 | 25,2 | 21,0 | 11,5 | 7,5 |
| $x_K$ | | 0,25 | 0,37 | 0,475 | 0,71 | 0,805 |
| $\overline{K}_o$ | | 0 | 3,6 | 6,4 | 8,6 | 12,5 |
| $\overline{Ca}_o$ | | 23 | 19,4 | 16,6 | 14,4 | 10,5 |
| $\bar{x}_K$ | | 0 | 0,15 | 0,28 | 0,375 | 0,54 |
| État d'équilibre du système | | | | | | |
| $K_E$ | 0 | 6,4 | 12,0 | 16,6 | 24,5 | 29,6 |
| $Ca_E$ | 40 | 33,6 | 28,0 | 23,0 | 15,0 | 9,2 |
| $x_K$ | 0 | 0,16 | 0,30 | 0,41 | 0,61 | 0,74 |
| $\overline{K}_E$ | 0 | 3,6 | 6,4 | 8,6 | 12,5 | 14,5 |
| $\overline{Ca}_E$ | 23 | 19,4 | 16,6 | 14,4 | 10,5 | 8,5 |
| $\bar{x}_K$ | 0 | 0,15 | 0,28 | 0,375 | 0,54 | 0,64 |

*Remarque.*

L'état initial est un état fictif, qui facilite la présentation des calculs : l'état initial ($n$) est défini par l'état d'équilibre ($n$ — 1) du sol et par la composition de la solution recomplétée ($n$) qu'on suppose ne pas avoir encore réagi avec le sol.

TABLEAU 5

*Suite d'équilibres ioniques entre le sol « N » et des solutions N/100 de potassium et de calcium* (extractions successives de Ca).

Isotherme N/100

| Numéro de l'équilibre | 0 | 1 | 2 | 3z | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| État initial du système | | | | | | |
| $K_o$ | | 2,50 | 4,10 | 5,25 | 7,35 | 8,50 |
| $Ca_o$ | | 7,50 | 5,90 | 4,65 | 2,65 | 1,50 |
| $x_K$ | | 0,25 | 0,41 | 0,53 | 0,73 | 0,85 |
| $\overline{K}_o$ | | 0 | 0,4 | 0,8 | 1,35 | 1,70 |
| $\overline{Ca}_o$ | | 5,8 | 5,4 | 5,0 | 4,45 | 4,10 |
| $\bar{x}_K$ | | 0 | 0,07 | 0,14 | 0,23 | 0,30 |
| État d'équilibre du système | | | | | | |
| $K_E$ | 0 | 2,1 | 3,7 | 4,7 | 7,0 | 8,05 |
| $Ca_E$ | 10 | 7,9 | 6,2 | 5,3 | 2,9 | 1,85 |
| $x_K$ | 0 | 0,21 | 0,37 | 0,47 | 0,70 | 0,80 |
| $\overline{K}_E$ | 0 | 0,4 | 0,8 | 1,35 | 1,70 | 2,10 |
| $\overline{Ca}_E$ | 5,8 | 5,4 | 5,0 | 4,45 | 4,10 | 3,70 |
| $\bar{x}_K$ | 0 | 0,07 | 0,14 | 0,23 | 0,30 | 0,36 |

V. — *Conclusions sur les techniques utilisées*

L'ensemble des points d'équilibre obtenus par ces deux techniques est cohérent, mais le tracé des isothermes 1N dans l'intervalle ($0 < x_K < 0{,}1$) et N/100 dans l'intervalle ($0{,}8 < x_K < 1$) devra être précisé par des mesures ultérieures.

## RÉSULTATS ET APPLICATIONS

### I. — *Résultats obtenus*

Les 9 isothermes d'échange K-Ca, ainsi déterminées, font apparaître la forme particulière des réseaux des trois sols étudiés (fig. 7, *a*, *b*, *c*). La figure 8, *a*, *b*, *c*, facilite la comparaison de ces sols lorsqu'ils sont en équilibre avec des solutions ioniques identiques.

Le réseau d'un sol est une représentation complète de son comportement, en tant qu'échangeur, à l'égard d'un couple d'ions donné. La préférence du sol pour l'un d'eux dépend des deux paramètres de la solution (concentration totale C et composition $x_K$) et de la nature de ses constituants propres, argiles et matière organique.

L'examen des réseaux d'isothermes des principales argiles minéralogiques et des différentes fractions de la matière organique des sols pourrait expliquer l'allure des isothermes des sols eux-mêmes ; et réciproquement, les isothermes de ces derniers pourraient servir à apprécier la composition minéralogique de leur fraction argileuse et certaines propriétés de leur complexe adsorbant.

Il reste donc à déterminer un certain nombre de réseaux de référence.

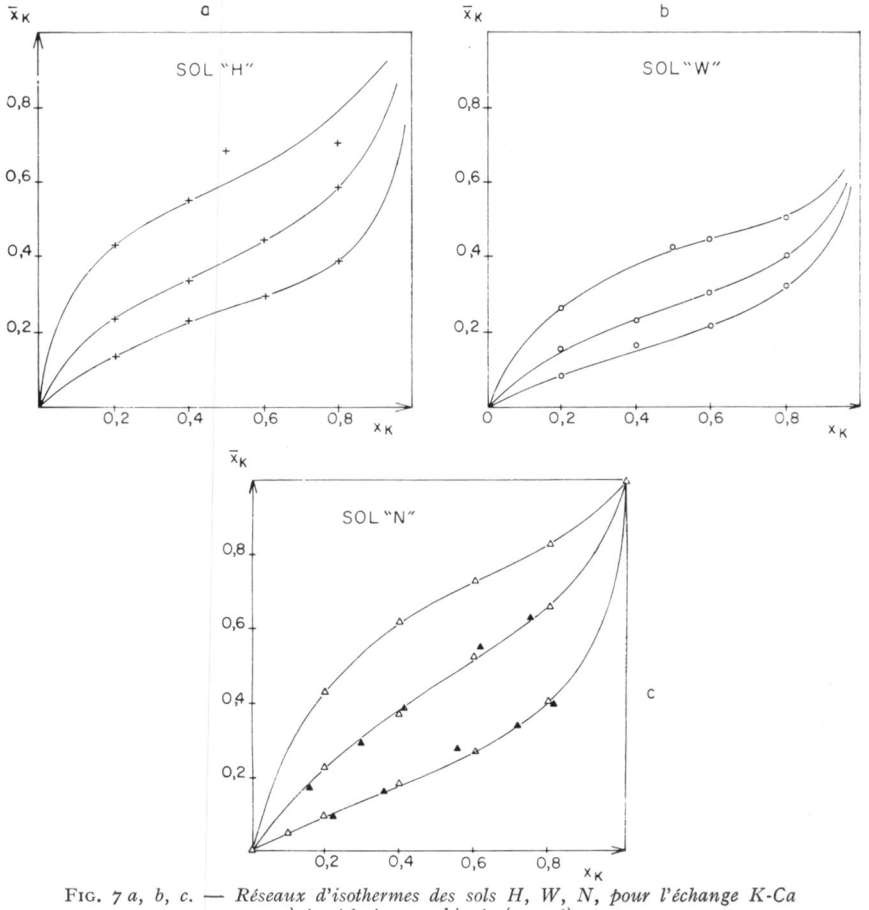



FIG. 7 *a, b, c.* — *Réseaux d'isothermes des sols H, W, N, pour l'échange K-Ca à température ambiante* (20-22°)

Pour chaque sol, les trois isothermes représentées correspondent, *de haut en bas*, aux concentrations cationiques totales 1 N, N/10, N/100.

Pour le sol N, les points (△) sont obtenus par la méthode générale et les points (▲) par extractions successives de Ca par K

\+ sol « H ».
o sol « W ».
△ sol « N ».

## II. — *Applications pratiques*

Nous reprenons ici les résultats d'un précédent travail expérimental (ANDRÉ, 1970). Des colonnes de sol calcaire (sol N) d'une C. E. C. de 40 méq reçoivent une dose de 40 méq $K^+$ en solution normale, puis subissent un lessivage prolongé à l'eau pure.

Les courbes donnant la fraction ionique $\bar{x}_K$ du haut en bas des colonnes, sont tracées à partir des dosages du potassium échangeable, encore présent à des stades de plus en plus avancés du lessivage.

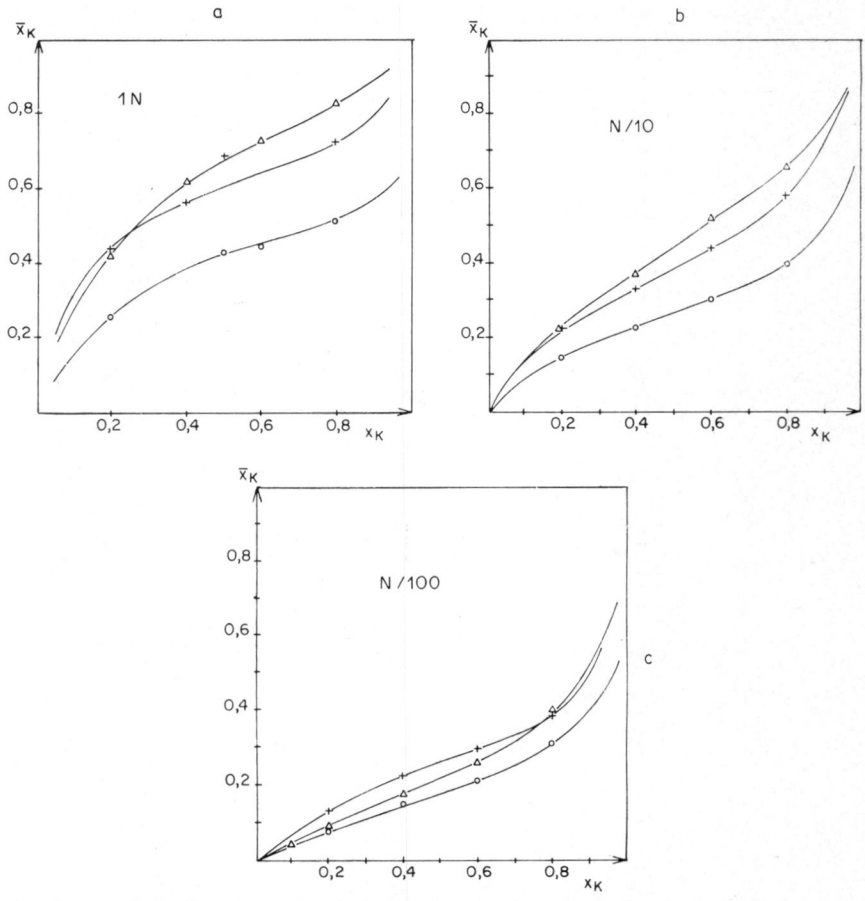



FIG. 8 *a, b, c.* — *Les mêmes isothermes sont groupées selon la concentration C de la solution*
On remarque que le sol W retient nettement moins le potassium que les sols H et N surtout lorsque la solution est concentrée

+ sol « H ».
o sol « W ».
Δ sol « N ».

Nous nous proposons d'utiliser le réseau K-Ca de ce sol pour retrouver graphiquement ces courbes de distribution $\bar{x}_K$.

En effet, nous avons constaté que les réactions d'échange observées ne mettent pratiquement en jeu que ces deux ions.

a) *Distribution initiale avant le lessivage.*

La dose de solution potassique (40 ml) représente environ 1/8 du volume d'eau saturante retenue par une colonne. En raison des simplifications imposées par cette

technique graphique, nous supposons que cette solution se met successivement en équilibre ionique avec 8 tranches fictives de colonne de sol, d'épaisseur et de C. E. C. égales. En plus, nous négligeons les phénomènes de diffusion (qui ne sont d'ailleurs pas considérables).

Dans ces conditions, la construction des 8 points d'équilibre est immédiate (point 1 à 8 de la fig. 9).

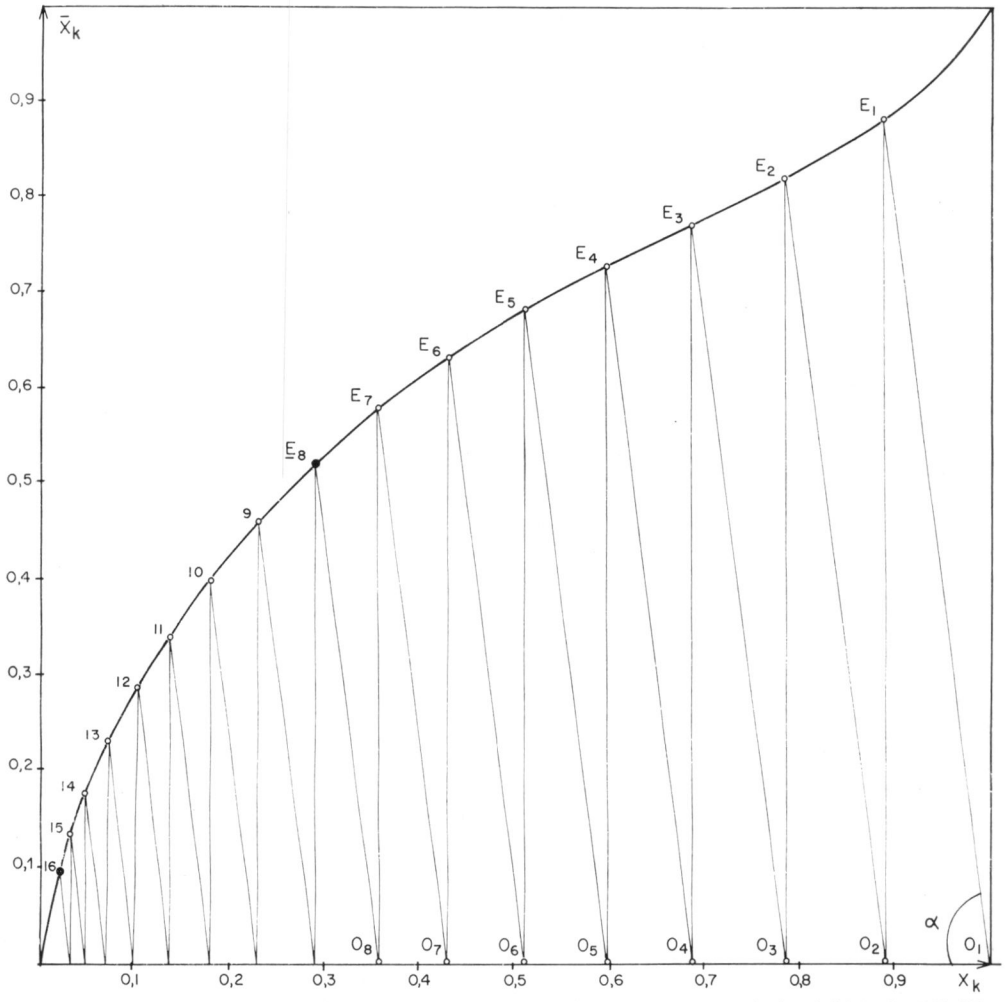



FIG. 9. — *Détermination graphique des points d'équilibre ionique entre une solution initiale de KCl 1N pur et des tranches successives égales d'une colonne de sol « N » ; la composition de la solution sortant de la colonne est donnée par l'abscisse de $E_8$ : 29 p. 100 du potassium apporté n'est pas retenu.*

(Les points 9 à 16 servent à la construction de la figure 10)

En effet, le point initial $O_1$ est défini par $\bar{x}_K = O$, $x_K = 1$ et le point $E_1$ est à l'intersection de l'isotherme 1 N et de la droite passant par $O_1$ et de pente égale à

$$\text{tg } \alpha = -\frac{40}{40/8} = -8$$

La solution pénètre dans la seconde couche de sol avec une composition définie par l'abscisse $x_1$ de $E_1$. Soit $O_2$ ($\bar{x}_K = O$, $x_K = x_1$) le point à partir duquel on trace à nouveau une droite de pente égale à — 8. Les points $E_2$ à $E_8$ s'obtiennent de la même façon : ils nous donnent les fractions ioniques $\bar{x}_1$ à $\bar{x}_8$ des 8 couches de la colonne (courbe *a* de la figure 11).

L'accord avec les courbes expérimentales peut être amélioré (courbe *b* de la figure 11) en considérant la dose de solution potassique comme la succession de deux fractions de 20 ml qui progressent dans la colonne en 16 étapes dans 16 tranches égales de sol.

Le rapport solution/sol étant inchangé, la construction graphique est rigoureusement la même que précédemment : le passage de la première fraction dans les 16 tranches conduit aux équilibres 1 à 16 (fig. 9). Le passage de la seconde fraction sur

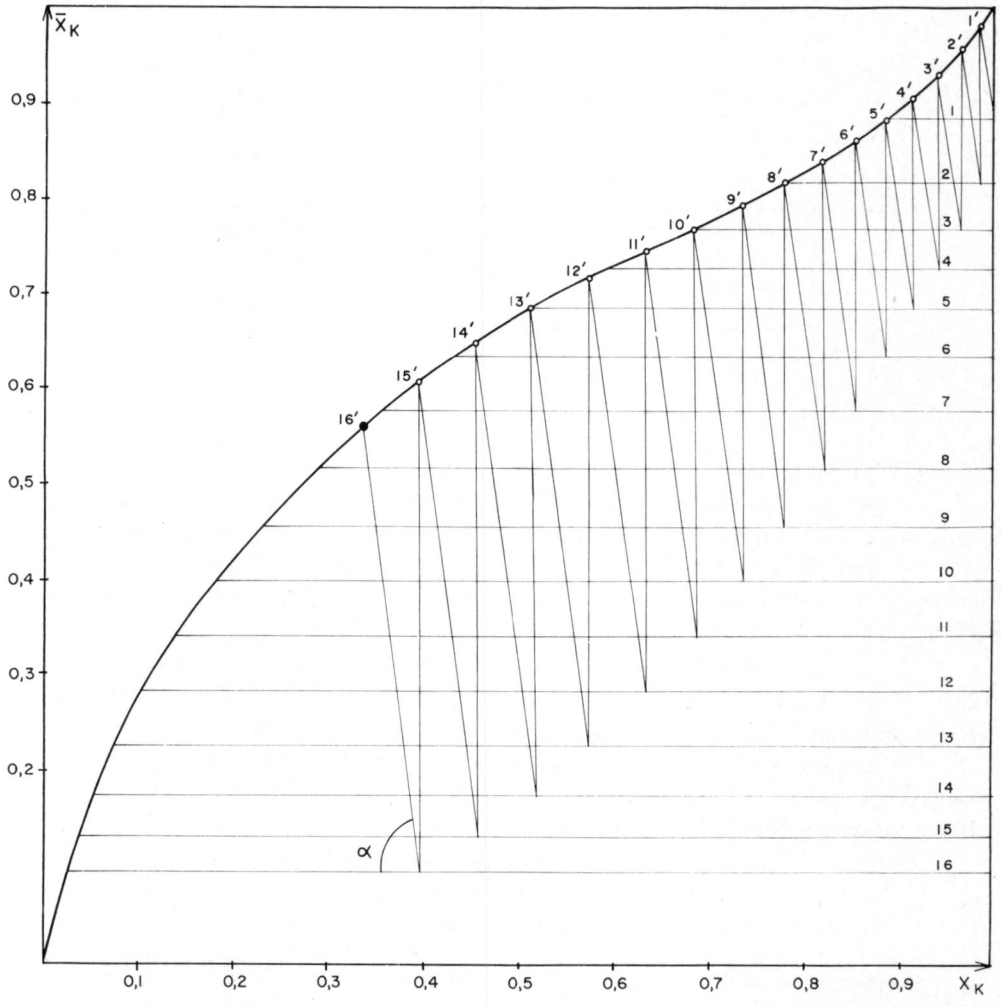



FIG. 10. — *Cette construction est plus proche que la précédente des conditions de percolation et d'échange continus dans la colonne de sol. Les abscisses des points 16 et 16' donnent, cette fois, la composition de la solution sortant de la colonne : 18 p. 100 seulement du potassium apporté n'est pas retenu.*

les 16 niveaux successifs de composition $\bar{x}_1$ à $\bar{x}_{16}$ conduit à 16 nouveaux équilibres 1′ à 16′ (fig. 10).

*Remarque.*

Les courbes *a* et *b* ainsi obtenues suivent convenablement les courbes expérimentales 1 et 2 (fig. 11), sauf dans le tiers supérieur des colonnes : en effet, la descente de la solution potassique est obtenue par la poussée de l'eau de lessivage, ce qui provoque un début de désorption dont il n'est pas tenu compte dans la construction graphique.

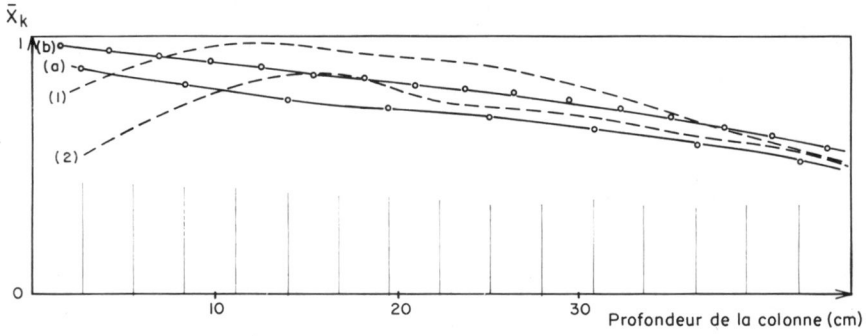



FIG. 11. — *Distribution $\bar{x}_K$ du potassium échangeable dans une colonne de sol N après le passage de 40 méq KCl en solution normale :*
En trait pointillé : courbes expérimentales
En trait continu : courbes obtenues graphiquement
(la colonne est en position verticale)

b) *Désorption de $K^+$ pendant le lessivage*

L'étude expérimentale de la désorption avait montré :

— que ce phénomène ne se produit dans les couches inférieures des colonnes qu'après l'épuisement quasi total du potassium échangeable des couches supérieures;

— que, pendant sa percolation à travers le sol, l'eau se charge de bicarbonates et de carbonates de potassium et de calcium et sort avec une concentration cationique totale C de l'ordre de 1 à 10 méq/l.

La construction de la figure 12 simule le lessivage par 1 litre d'une solution $Ca^{++}$ N/100 d'une colonne du même sol dont la teneur initiale en K échangeable serait uniforme d'une extrémité à l'autre ($\bar{x}_K = 0{,}6$ par exemple).

On suppose que la colonne est divisée en trois tranches fictives égales et que la solution passe en 10 fractions de 100 ml. Le passage de celles-ci conduit à 10 équilibres successifs dans chaque tranche :

1 à 10 pour la tranche supérieure
1′ à 10′ pour la tranche médiane
1″ à 10″ pour la tranche inférieure

Le rapport sol/solution est constant et tel que

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{10/10}{40/3} = -\frac{3}{40}$$

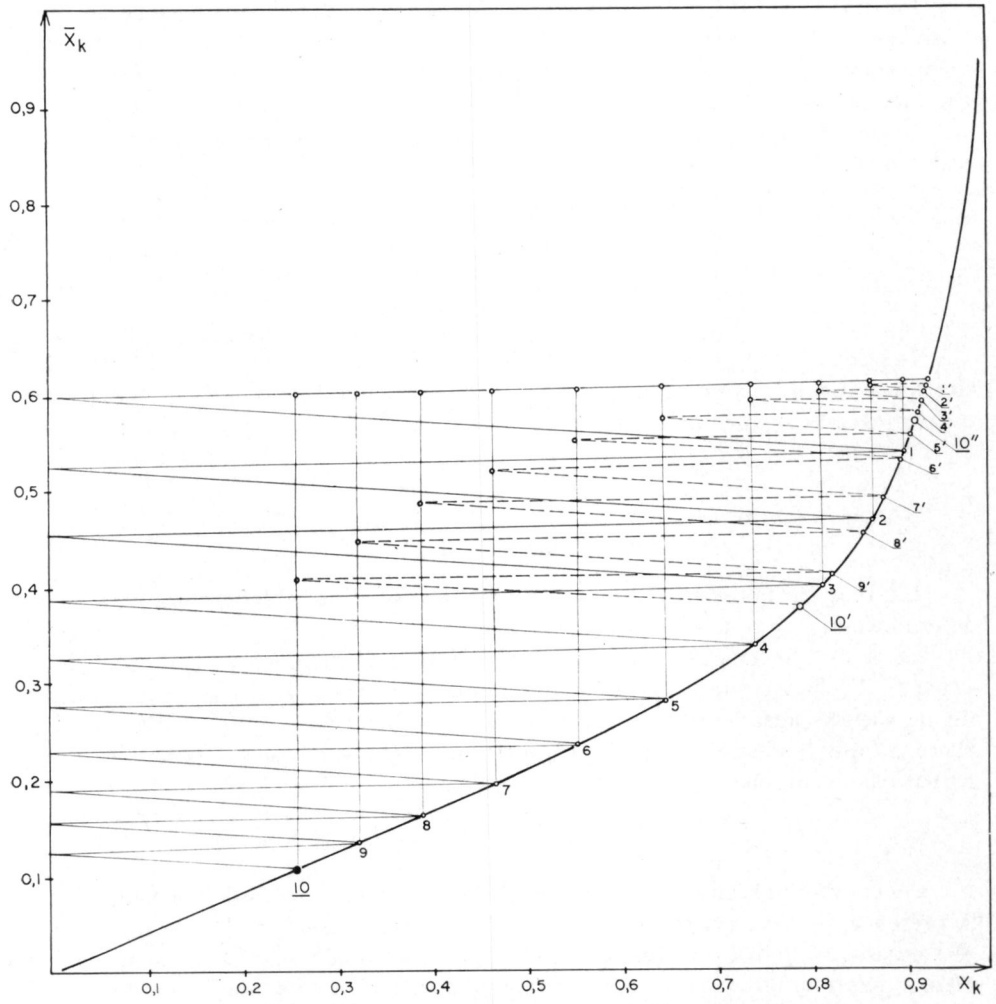



FIG. 12. — *Construction graphique permettant de déterminer l'effet du passage de 1 litre de solution de $CaCl_2$ N/100, sur la distribution du potassium échangeable dans une colonne de sol « N »* ($\bar{x}_K$ initial = 0,6)

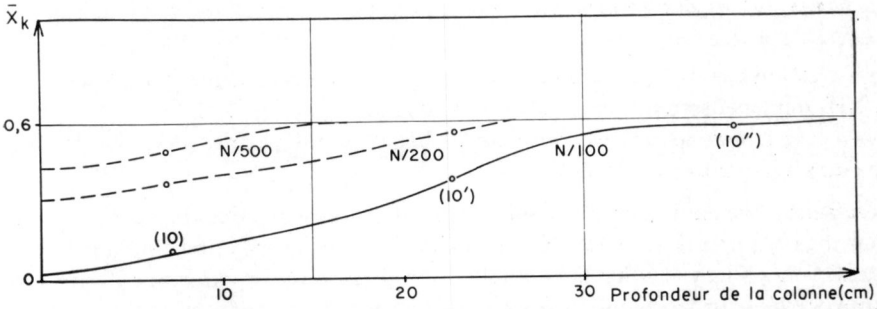



FIG. 13. — *Distribution de K échangeable dans la colonne de sol « N » après le passage de 1 l. de solutions $CaCl_2$ N/100, N/200, N/500* ($\bar{x}_K$ initial = 0,6) (la colonne est en position verticale).

Les points 10, 10' 10'' donnent les valeurs de $\bar{x}_K$ dans chaque tranche après ce lessivage. Ils sont reportés dans la figure 13 où nous avons également l'effet sur la même colonne du passage de 1 litre de solution Ca N/200 et N/500 (d'après des isothermes extrapolées).

Nous retrouvons bien la forme caractéristique des courbes de désorption (ANDRÉ, 1970).

## DISCUSSION

### I. — *Précision des résultats*

Les équilibres, qui nous ont conduit aux réseaux d'isothermes mettent en jeu des quantités de cations échangeables comprises entre 0,1 et 1,5 méq environ et déterminées à 0,05 méq près, compte-tenu des principales sources d'erreurs :

$$\overline{K} \text{ (ou } \overline{Ca}) \text{ moyen} \cong (0{,}7 \pm 0{,}05) \text{ méq}$$

$$\frac{\Delta \bar{x}_K}{\bar{x}_K} \cong \frac{\Delta \overline{K}}{\overline{K}} = \frac{0{,}05}{0{,}7} \sim 7\ \%$$

L'erreur sur l'abscisse des points d'équilibre est négligeable ; les ordonnées sont déterminées à $\pm$ 7 p. 100 en moyenne.

Certains phénomènes parasites (légère rétrogradation de K, variation de la capacité d'échange, gradient de concentration de la solution au voisinage immédiat de la surface adsorbante, etc. ont pu se superposer à l'échange K-Ca. Les isothermes, qui tendent à décrire le comportement global des sols, intègrent ces perturbations éventuelles.

### II. — *Observations sur les isothermes*

Ces courbes présentent une forme en S, surtout visible aux fortes concentrations : la présence de deux types de sites retenant préférentiellement chaque cation peut être envisagée mais il est possible que le choix des coordonnées soit responsable de cette « déformation » des courbes. Il faut remarquer en effet que lorsque les deux cations n'ont pas la même valence, la force ionique de la solution varie avec sa composition. La première hypothèse a pourtant permis d'expliquer le comportement analogue de certains zéolithes (HELFFERICH, 1962).

L'usage de ces isothermes convient à l'étude de problèmes agronomiques qui mettent en jeu deux cations :

— c'est le cas de la fertilisation potassique ou ammoniacale parce que les ions K et $NH_4$ déplacent en majeure partie des ions Ca;

— ce peut être le cas des traitements de sols salins par des solutions calciques, ou de l'amendement de sols très acides.

On peut aussi envisager la représentation, dans le même diagramme, de l'échange de trois ions, au prix d'un paramètre supplémentaire qui sera l'une des trois fractions ioniques : on pourra étudier les équilibres de deux d'entre eux pour des fractions ioniques variées du troisième : c'est ce que l'on ferait en étudiant l'échange K-Ca à différents pH.

## CONCLUSION

Le réseau d'isothermes en diagramme carré semble avoir, sur les autres modes de représentation des échanges ioniques, plusieurs avantages essentiels :

— c'est l'exacte traduction du phénomène réel ;

— c'est une représentation claire et précise : tous les paramètres sont obligatoirement définis ;

— il se prête à des constructions géométriques simples qui permettent de suivre des réactions d'échange dans des systèmes variés.

*Reçu pour publication en août 1970.*

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier J. CHAUSSIDON (Station centrale d'Agronomie, Versailles) pour ses conseils sur la présentation des propriétés des isothermes et R. BLANCHET (Directeur de la Station d'Agronomie de Toulouse) pour ses encouragements.

## SUMMARY

### SYSTEMS OF ION EXCHANGE ISOTHERMS IN THE SOIL AND THEIR PROPERTIES

The phenomena of ion exchange in the soil can be described by certain approximate formulae. They can also be expressed by experimental curves integrating all the secondary reactions, but of which the equations are unknown.

This is particularly the case with isotherm systems on square diagram, in which the whole symmetry of the exchange is preserved.

This paper explains the principle of the above method of presentation, its properties, one of which being to allow the prevision of the equilibria of « soil-solution » system, by means of an original graph plot, and finally its chief agricultural uses.

## ZUSAMMENFASSUNG

### EIGENSCHAFTEN DER IONENAUSTAUSCH-ISOTHERMEN DER BÖDEN

Die Ionenaustausch-Phänomene in den Böden können durch bestimmte, angenähernde Formeln beschrieben werden. Sie können auch durch experimentale Kurven dargestellt werden, die die gesamten sekundären Reaktionen umfassen, deren Gleichungen aber unbekannt sind.

Dies gilt insbesondere für die Isothermequadratdiagrammen die die vollständige Symmetrie des Austausches bewahren.

Das Prinzip und die Eigenschaften dieser Darstellungsart sind hier ausgeführt. Eine derselben besteht in der Möglichkeit, mittels einer originalen graphischen Konstruktion, die Gleichgewichtaussichten des Systeme « Böden-Ionenlösung » vorauszubestimmen und anschliessend die haptsächlichen agronomischen Anwendungen festzulegen.

## РЕЗЮМЕ

*Заметка об изотермах ионного обмена в почвах и о сетях концентраций.*

Ж. П. АНДРЭ.

Феномен ионного обмена в почвах можно выразить приблизительными формулами и экспериментальными кривыми, включающими все вторичные реакции, формулы которых неизвестны.

Это относится в частности к изотермическим сетям в квадратной диаграмме, которые сохраняют полную симетрию обмена.

В данной заметке рассматриваются принципы этого способа воспроизведения и его свойства, одно из которых заключается в возможности предвидеть равнвесные состояния систем « почва — раствор » с помощью оригинальной графической конструкции, а также и их главные агрономические применения.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


André J.-P., 1970. Étude expérimentale de la rétention par un sol calcaire, soumis à un lessivage intense, de doses massives de potassium. *Ann. agron.*, **21**, (2), 211-228.

Beckett Ph., 1964. Potassium-Calcium exchange equilibria in soils : specific adsorption sites for potassium. *Soil Sci.*, **6**, 376-383.

Emschwiller G., 1951. *Chimie Physique*, tome II, p. 542 et suiv., P. U. F., Paris.

Gaines G. L., Thomas H. C., 1953. Adsorption studies on Clay Minerals. II. Formulation of the thermodynamics of Exchange Adsorption. *J. Chem. Phys.*, **21**, 714-718.

Helfferich F., 1962. *Ion Exchange*, 624 p., Mc Graw Hill Book, New York.

Levy, Hillel, 1968. Thermodynamic equilibrium constants of sodium-calcium exchange in some Israel Soils. *Soil Sci.*, **106**, 393-398.

Rezk A. I., Fathi Amer., 1969. Exhangeable potassium and its Selectivity by soils as Quantity-Intensity Parameters for Soil Potassium. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **33**, 876-879.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (6), 725-757.

# INFLUENCE DES COMPOSÉS ORGANIQUES SOLUBLES SUR LA PÉDOGENÈSE EN MILIEU ACIDE (1)

## II. — Expériences de laboratoire modalités d'action des agents complexants (2)

S. BRUCKERT

*Centre de Pédologie*
*Faculté des Sciences, 54 - Nancy*
*Centre national de la Recherche scientifique*

RÉSUMÉ

Afin de compléter des recherches effectuées *in situ*, nous décrivons ici des résultats d'expériences de laboratoire qui ont démontré les mécanismes pédogénétiques suivants :

*Dans les sols à mor*, les acides organiques persistent dans les litières, filtrent à travers les horizons A et parviennent dans les horizons B des podzols, mais seuls les acides aliphatiques jouent un rôle important dans la complexation et l'entraînement des cations Fe, Al ; de plus, ces mêmes acides favorisent la migration des polymères issus des litières. Dans les horizons spodiques, tous les acides étudiés, aromatiques et aliphatiques, sont insolubilisés en premier lieu par un processus essentiellement *chimique*, puis sont en partie minéralisés et surtout incorporés à des composés humiques plus ou moins polymérisés.

*Dans les sols à mull*, une forte activité biologique jointe à la présence constante de cations échangeables provoque une insolubilisation et une transformation sur place (dans la litière et le mull) des acides avec intégration *biochimique* aux composés humifiés très polymérisés ; toute migration de complexes est inhibée.

## Chapitre III

## EXPÉRIENCES DE LABORATOIRE : MODALITÉ D'ACTION DES AGENTS COMPLEXANTS

Après avoir démontré *in situ* 1° l'action prépondérante des acides organiques simples en tant qu'agents complexants actifs vis-à-vis du fer, 2° l'évolution divergente de ces composés dans les sols à mull ou à mor, nous présentons maintenant des

(1) Extrait d'une thèse de Doctorat d'État soutenue à la Faculté des Sciences de l'Université de Nancy le 8 juin 1970.

(2) La 1re partie est parue dans le n° 4 (1970) des Annales agronomiques.

résultats de recherches expérimentales entièrement consacrées à l'étude des quatre acides organiques les plus représentatifs au point de vue pédogénétique dans ces sols : acides citrique, oxalique, vanillique et *p*-hydroxybenzoïque. Il s'agit essentiellement de deux expériences complémentaires, l'une de type « dynamique », l'autre de type « statique ».

*L'expérience « dynamique »* consiste à percoler les acides désignés ci-dessus à travers des horizons types caractéristiques d'un sol brun lessivé et d'un podzol humo-ferrugineux ; elle permet de comparer la mobilité de ces composés et de montrer leur rôle dans le lessivage des cations.

*L'expérience « statique »* met en évidence les mécanismes de transformation des acides organiques grâce à l'emploi de molécules radioactives introduites dans les mêmes horizons que ceux étudiés dans l'expérience précédente, et mis à incuber pendant trois semaines.

On se propose donc d'exposer ici les résultats les plus démonstratifs de ces recherches ; ensuite, on effectuera une discussion commune en vue d'aboutir aux conclusions générales.

## I. — Étude « dynamique » : expériences de percolation d'acides a travers les horizons caractéristiques d'un sol a mull et d'un sol a mor

Dans les sols, l'action complexante des acides organiques ne peut intervenir :

1° si leurs molécules sont adsorbées sur les argiles et les sesquioxydes (Bingham *et al.*, 1965 ; King et Bloomfield, 1966) ou bien insolubilisées à la suite de transformations purement chimiques ;

2° si ces mêmes molécules sont rapidement métabolisées par une microflore tellurique active (Crawford, 1956 ; Dommergues et Duchaufour, 1965 ; Bruckert et Dommergues, 1966).

Étant donné que ces deux processus interviennent simultanément dans le sol, mais avec des intensités différentes, on a mis au point à l'occasion d'une étude préalable (Bruckert et Dommergues, 1968), une technique capable de dissocier dans une large mesure, le rôle des facteurs microbiologiques de celui des facteurs physico-chimiques.

D'autre part, le dispositif expérimental choisi, qui consiste à enrichir les sols en substrat par percolation lente, permet de rendre compte de l'intensité des migrations d'acides organiques et des cations entraînés dans les eaux de lessivage.

### 1. — *Matériel et méthodes d'étude*

1. *Choix du matériel d'étude.*

Afin d'augmenter les contrastes, nous avons choisi et utilisé les horizons d'un sol brun lessivé ($A_1$) et d'un podzol humo-ferrugineux ($A_1$, $B_h$) provenant respectivement du plateau lorrain (Grande-Fraize) et du massif des Basses-Vosges (Taintrux). Les descriptions et les caractéristiques de ces profils sont mentionnés au chapitre II, § II.

2. *Méthodes d'étude.*

Chaque échantillon de sol (80 g) introduit dans un tube à percolation (diamètre : 2,6 cm ; hauteur de la terre : 13 cm), est imprégné très lentement (1 goutte/15 s) soit par une solution de

l'acide étudié, faiblement concentrée (0,25 à 1 p. 1 000) soit par de l'eau (témoin) ; après chaque percolation, à raison de 50 ml/24 heures, on mesure l'éluat recueilli. L'écoulement à travers l'horizon étant libre, ce procédé permet d'enrichir les divers milieux par des acides faiblement solubles (acides phénols). A partir de ce protocole, nous pouvons aussi déterminer la quantité d'acide maintenue en solution (éluat) et analyser l'intensité du lessivage des cations. Les acides sont dosés par titrimétrie (aliphatiques) et par photométrie en lumière UV (phénoliques) ; les résultats sont confirmés par chromatographie suivant les techniques décrites par BRUCKERT(1970). D'autre part, la détermination des cations présents dans l'éluat est effectuée par absorption atomique, après centrifugation à 18 000 t/mn.

En ce qui concerne les acides organiques, il nous a paru opportun de dissocier leurs transformations biologiques de leurs transformations physico-chimiques ; pour cette raison, nous avons inhibé le développement de la microflore en maintenant une série d'échantillons à $0^{o} \pm 1^{o}C$, les résultats étant comparés à des milieux maintenus à $20^{o} \pm 1^{o}C$. Toutes les expériences sont répétées au minimum deux fois.

## 2. — *Résultats*

Le détail des résultats concernant la répartition de chaque acide au 10e jour de l'expérience, a été exposé et discuté dans une publication récente (BRUCKERT et JACQUIN, 1969 *a*) ; on distinguait notamment la *fraction éluée* ou acide maintenue en solution (E) de la *fraction retenue par le sol* (R) ; cette dernière fraction se divisait elle-même en acide minéralisé en $CO_2$, en acide extractible en fin d'expérience par l'eau, par la soude 2 N ou à l'aide d'une résine échangeuse de cations, enfin en acide insolubilisé, transformé à 0°C par des processus de nature essentiellement physico-chimique ($I_0$) ou transformés à 20°C par des processus de nature biochimique (I20).

Dans ces conditions, nous nous bornerons à exposer ici les résultats concernant la fraction éluée, nous réservant d'exploiter ultérieurement les résultats se rapportant à la fraction retenue, lors de la confrontation des expériences dynamique et statique.

En ce qui concerne l'étude de chaque composé, nous avons consigné dans le tableau 16, les pourcentages d'acide élué en 10 jours, mais les valeurs observées ne fournissant qu'un résultat global, il nous a semblé indispensable de mesurer également la « cinétique » du phénomène et d'établir des courbes des taux élués en fonction du temps (fig. 5, 7, 8 et 10).

### 1. *Expériences portant sur les acides aliphatiques.*

#### 1. 1. *Migration de l'acide citrique.*

Les différences d'élution de l'acide citrique constatées à 0°C et 20°C, c'est-à-dire quand le développement de la microflore est soit inhibé, soit favorisé, confirment le rôle des micro-organismes déjà noté à l'occasion d'une étude antérieure (BRUCKERT et DOMMERGUES, 1968) ; cette différence apparaît d'autant plus accusée que l'activité biologique spécifique de la dégradation de l'acide citrique est plus élevée. Si on examine notamment les résultats obtenus à 20°C, on observe que la quantité d'acide citrique retrouvée dans l'éluat est maximum après passage à travers l'horizon $A_1$ de podzol (65,1 p. 100), moyenne après l'horizon $B_h$ (31,9 p. 100) et presque nulle après l'horizon $A_1$ de sol brun lessivé (0,5 p. 100).

Les courbes donnant les taux d'acide élué en fonction du temps, permettent d'obtenir des données plus précises sur le pouvoir de rétention du sol étudié à l'égard de l'acide (fig. 5).

La pente au point d'inflexion est d'autant plus relevée que l'horizon retient moins l'acide citrique ; pour l'horizon $A_1$ d'un podzol, on obtient une verticale quelle que soit la température ; par contre, pour le $B_h$, l'angle avec l'axe des abscisses devient

beaucoup plus aigu, surtout à une température de 20°C ; enfin, cette pente s'estompe fortement dans le cas du mull maintenu à 0°C pour disparaître si ce même sol est incubé à 20°C.

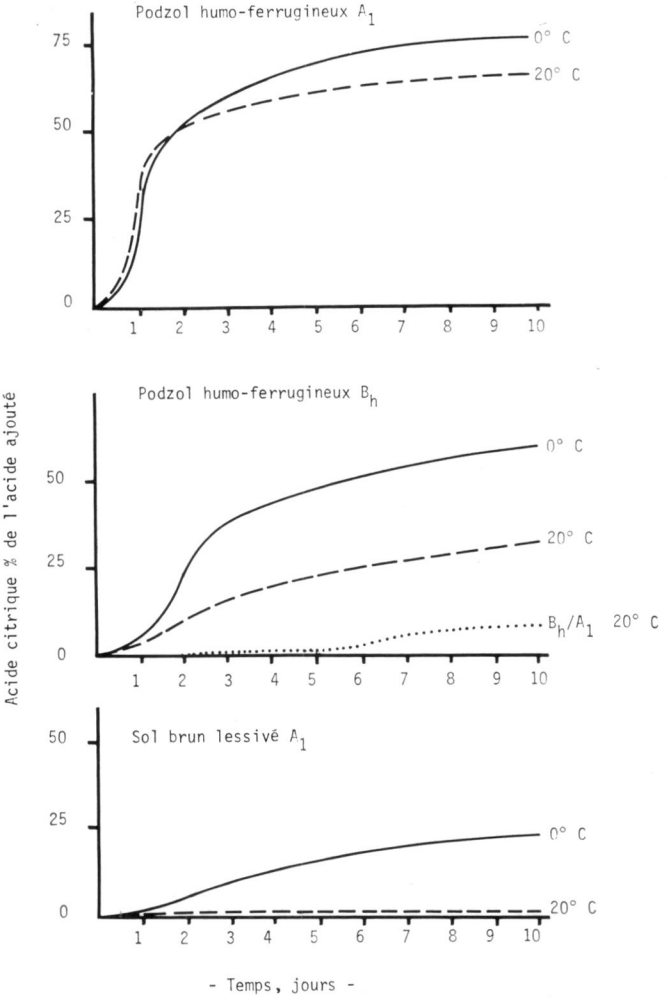



FIG. 5. — *Pourcentages cumulés d'acide citrique maintenu en solution, représentés en fonction du temps*

Il est intéressant de comparer les résultats concernant les horizons podzoliques avec ceux des profils situés dans leur milieu naturel. Nos travaux antérieurs ont montré la présence d'acide citrique dans les différents horizons de ce même podzol, mais la teneur en acide des solutions de sol à la base du mor égale au plus 1/6 de la concentration utilisée dans notre expérience ; en tenant compte de cette relation terrain-laboratoire, il nous a semblé que l'évolution de l'acide citrique observée durant les premiers jours de la percolation était la plus significative, comme en témoignent les figures 5 et 6. De ce fait, on est en droit de penser que ce composé peut traverser aisément les horizons A (pente verticale et valeur de E supérieure à 50 p. 100) et migrer jusqu'en $B_h$ où sa mobilité sera diminuée. Afin de préciser ce point,

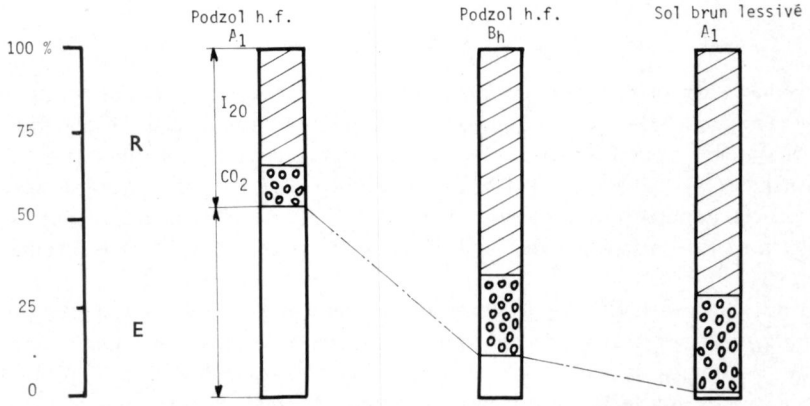



FIG. 6. — *Répartition de l'acide citrique au 2e jour d'incubation à une température favorable au développement des micro-organismes* (20°C)

R = acide retenu par le sol
E = acide présent dans l'éluat

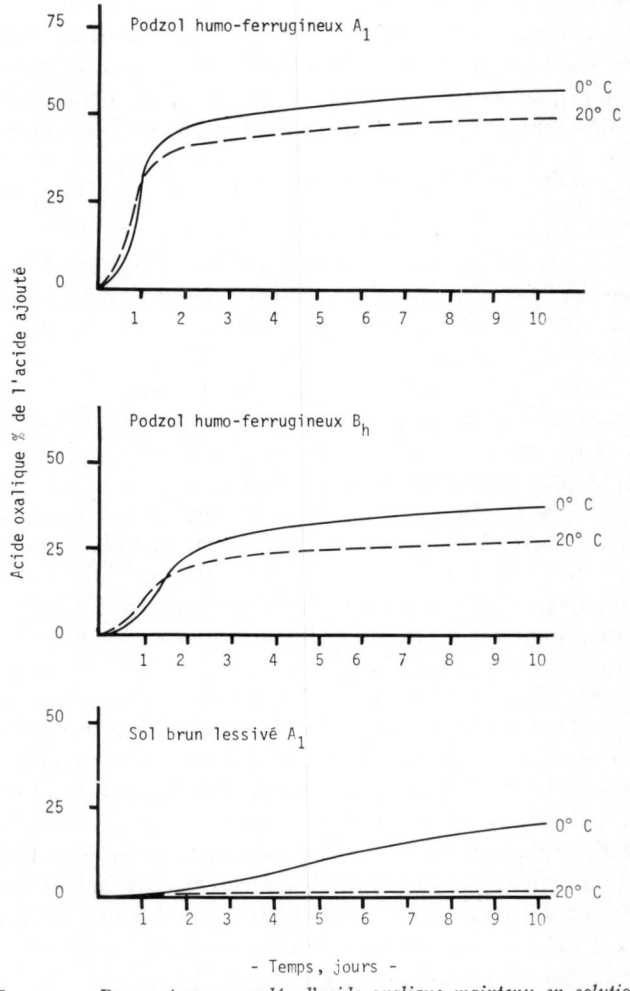



FIG. 7. — *Pourcentages cumulés d'acide oxalique maintenu en solution, représentés en fonction du temps*

nous avons entrepris une expérience complémentaire en percolant une solution d'acide citrique à travers un $A_1$ superposé à un $B_h$ ; dans ce cas, on constate que la quantité d'acide recueillie dans l'éluat est considérablement diminuée (fig. 5 : courbe en pointillé $B_h/A_1$) et qu'elle est loin d'atteindre la valeur théorique donnée par le calcul ; cette expérience met donc en évidence, d'une part la migration de l'acide citrique dans les horizons A des podzols, d'autre part le pouvoir de rétention d'un horizon $B_h$.

Enfin, dans les conditions naturelles, on peut penser que l'acide citrique retenu par l'horizon $B_h$ sera transformé en toute saison, même en hiver. En effet, si en période de fonte des neiges, le mor présente une température voisine de 0°C, permettant le lessivage maximum, le $B_h$ en raison du gradient de température mesuré dans les sols en place, se trouve à une température de 5°C environ (BUCKMAN et BRADY, 1960) ; or, à 5°C, le développement de la microflore n'est que faiblement ralenti (BRUCKERT et DOMMERGUES, 1968).

1.2. *Migration de l'acide oxalique.*

En ce qui concerne ce composé simple, les résultats obtenus peuvent être rapprochés de ceux observés pour l'acide citrique ; en particulier, l'examen comparé des figures 5 et 7 rend compte de l'élution semblable des acides citrique et oxalique et du rôle pédogénétique identique que ces deux produits pourront jouer dans les sols étudiés.

2. *Expériences portant sur les acides phénols.*

2.1. *Migration de l'acide vanillique.*

Lorsque l'activité biologique est inhibée, c'est-à-dire dans l'expérience à 0°C, l'éluat correspondant à un $A_1$ de podzol est deux fois plus riche en acide vanillique (54,2 p. 100) que celui correspondant à un $B_h$ (28,4 p. 100) ou à un $A_1$ de sol brun lessivé (19 p. 100 : tabl. 16).

Si le développement des micro-organismes est favorisé (20°C), le podzol se distingue avec netteté du sol brun lessivé : dans le premier, l'acide vanillique maintenu en solution représente 25 p. 100 ($B_h$) à 33 p. 100 ($A_1$) de l'acide ajouté, alors que dans le second (mull) ce pourcentage est extrêmement faible (2,2 p. 100).

Soulignons encore la rétention de l'acide vanillique par l'horizon d'accumulation humique $B_h$ et ceci quelle que soit la température ; ces caractéristiques sont illustrées par la courbe cumulative obtenue en fonction du temps (fig. 8). En effet, l'acide vanillique, présent dès le premier jour dans l'éluat du mor, n'apparaît seulement qu'au 5e jour dans celui du $B_h$ ; d'autre part, la pente au point d'inflexion révèle une élution très progressive pour le $B_h$.

Dans les conditions naturelles, compte tenu des remarques évoquées à l'occasion de l'étude de l'acide citrique et de la faible solubilité de l'acide vanillique, il paraît logique de considérer surtout les processus intervenant pendant les 5 premiers jours ; au cours de cette période, et quelle que soit la température du sol, au moins 25 p. 100 de la quantité d'acide vanillique soluble des horizons A peuvent migrer et atteindre l'horizon $B_h$ d'un podzol où cet anion aromatique est fortement retenu (fig. 9). On peut donc penser que la mobilité de l'acide vanillique dans les horizons A des podzols et la participation de ce composé à la formation des substances humiques des horizons $B_h$ interviennent en toute saison : en hiver au cours d'une période de dégel ou en été au cours de pluies estivales.

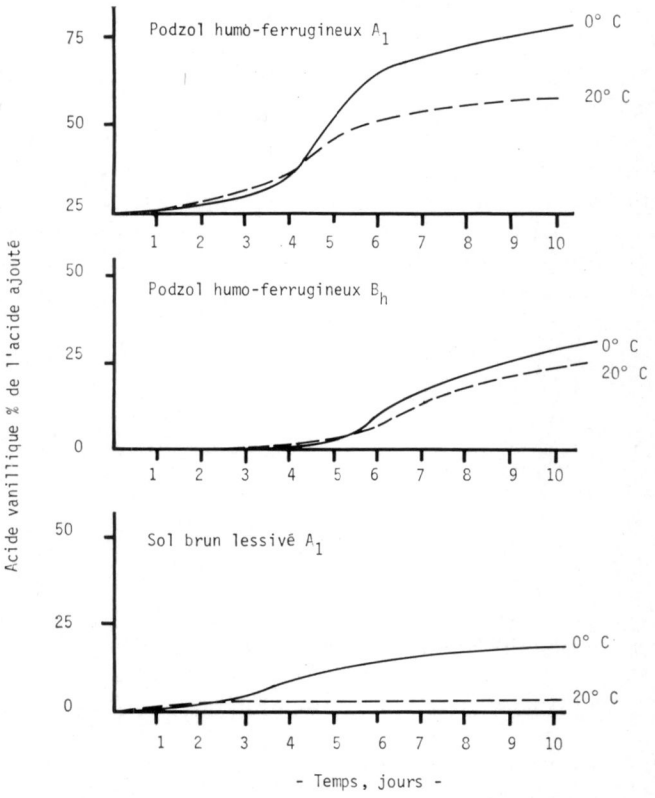



FIG. 8. — *Pourcentages cumulés d'acide vanillique maintenu en solution, représentés en fonction du temps*

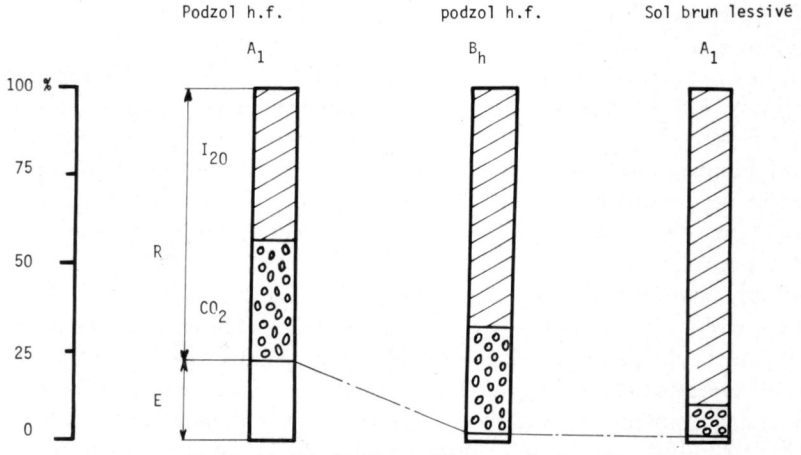



FIG. 9. — *Répartition de l'acide vanillique au 5e jour d'incubation à une température favorable au développement des micro-organismes* (20°C)

R = acide retenu par le sol ; E = acide présent dans l'éluat

2.2. *Migration de l'acide* p-*hydroxybenzoïque.*

Si les échantillons sont maintenus à une température défavorable à l'activité biologique (0°C) il apparaît que l'élution de l'acide *p*-hydroxybenzoïque diffère peu de celle de l'acide vanillique ; par contre, à une température favorable au développement des micro-organismes (20°C), cet acide comparé à l'acide vanillique est plus fortement retenu et transformé non seulement par les sols bruns lessivés, mais aussi par les sols podzoliques (tabl. 16). Ceci montre que l'acide *p*-hydroxybenzoïque pourra suivre une évolution identique à celle de l'acide vanillique lorsque la température avoisinera 0°C ; l'opposition entre le comportement de ces deux acides apparaîtra fortement aux températures plus élevées, le premier étant largement transformé dès la surface même dans les podzols (fig. 10).

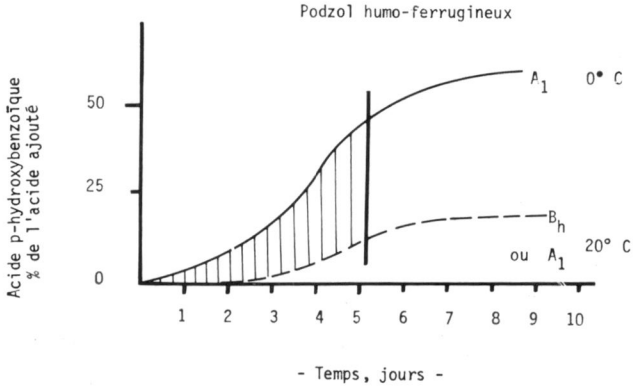



FIG. 10. — *Pourcentages cumulés d'acide* p-*hydroxybenzoïque maintenu en solution représentés en fonction du temps*

3. *Lessivage des cations par les acides citrique et oxalique.*

Entre ces deux composés choisis parmi les acides aliphatiques les plus importants des profils, c'est incontestablement l'acide citrique qui met en solution les plus grandes quantités des divers cations dosés (tabl. 17). Parmi ces éléments, le fer et l'aluminium sont particulièrement abondants dans les éluats acides comparés aux éluats aqueux (témoins). L'acide citrique et l'acide oxalique solubilisent tous deux de grandes quantités d'aluminium, mais le premier complexe quantitativement plus de fer que le second ; ceci est vérifié de façon démonstrative à 0°C : en $B_h$, la quantité d'aluminium mise en solution avoisine 50 mg quel que soit l'acide percolé ; par contre, la quantité de fer diffère suivant l'anion employé puisque l'acide citrique met en solution 15 mg de fer (rapport Al/Fe = 3) et l'acide oxalique 1,5 mg, soit 10 fois moins (rapport Al/Fe = 30).

Effectuons maintenant une étude comparée des divers horizons : l'horizon $A_1$ d'un podzol libère des quantités relativement faibles de cations bien que l'éluat correspondant à ce milieu soit riche en acides aliphatiques ; ceci s'explique en raison de la pauvreté en cations de cet horizon lessivé ; la mise en solution du fer et de l'aluminium peut même être inférieure à celle observée dans le mull quand les expériences sont conduites à 0°C. Le milieu capable de fournir la plus grande quantité de fer et d'aluminium correspond incontestablement à l'horizon $B_h$ riche en hydroxydes et en complexes organo-métalliques ; ces derniers composés insolubilisés en

TABLEAU 16. — *Migration des acides organiques : taux* (E) *d'acide recueilli dans l'éluat en 10 jours d'incubation à une température favorable* (20°C) *ou défavorable* (0°C) *au développement des micro-organismes*

| Acide maintenu en solution % de l'acide percolé | Température d'incubation 20°C | | | Température d'incubation 0°C | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | S. B. less. $A_1$ (mull) | Podzol h. f. | | S. B. less. $A_1$ (mull) | Podzol h. f. | |
| | | $A_1$ (mor) | $B_h$ | | $A_1$ (mor) | $B_h$ |
| Acide citrique | 0,5 | 65,1 | 31,9 | 22,4 | 75,5 | 55,1 |
| Acide oxalique | 0,05 | 45,9 | 30,1 | 21,4 | 55,6 | 38 |
| Acide vanillique | 2,2 | 33,1 | 24,8 | 19 | 54,2 | 28,4 |
| Acide p-hydroxybenzoïque | 1 | 14 | 15,1 | 33,5 | 57,9 | 43,1 |

TABLEAU 17 — *Cations exprimés en mg, mis en solution par les acides citrique et oxalique* (éluats)

| Cations (mg) lessivés par un acide ou par l'eau | | Température d'incubation 20°C | | | Température d'incubation 0°C | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | S. B. less. $A_1$ (mull) | Podzol h. f. | | S. B. less. $A_1$ (mull) | Podzol h. f. | |
| | | | $A_1$ (mor) | $B_h$ | | $A_1$ (mor) | $B_h$ |
| Acide citrique | Ca | 14,12 | 0,55 | 1,10 | 35,64 | 0,46 | 0,37 |
| | Mg | 1,99 | 0,87 | 0,29 | 4,23 | 0,92 | 0,25 |
| | K | 6,60 | 1,53 | 3,75 | 6,97 | 1,50 | 3,69 |
| | Fe | 5,97 | 1,10 | 16,61 | 9,32 | 1,06 | 14,97 |
| | Al | 7,53 | 5,61 | 51,48 | 20,45 | 4,80 | 49,47 |
| Acide oxalique | Ca | 2,31 | 0,64 | 0,19 | 10,59 | 0,43 | 0,12 |
| | Mg | 0,30 | 0,30 | 0,09 | 1,71 | 0,28 | 0,09 |
| | K | 1,25 | 1,06 | 4,42 | 2,69 | 0,62 | 4,30 |
| | Fe | 0,68 | 4,07 | 4,53 | 2,33 | 3,82 | 1,46 |
| | Al | 0,43 | 11,41 | 36,93 | 14,99 | 10,06 | 55,33 |
| Eau (témoin) | Ca | 2,38 | 0,22 | 0,21 | | | |
| | Mg | 0,41 | 0,05 | 0,09 | | | |
| | K | 2,06 | 1,21 | 1,36 | | | |
| | Fe | 1,57 | 0,31 | 0,57 | | | |
| | Al | 1,60 | 0,19 | 1,33 | | | |

milieu naturel seraient déplacés dans les conditions de l'expérience par les acides étudiés en raison de leur pouvoir complexant très élevé (GALLAGHER et WALSH, 1943 ; SCHNITZER et SKINNER, 1964).

4. *Lessivage des cations par les acides vanillique et* p-*hydroxybenzoïque.*

Ces deux composés phénoliques caractéristiques des sols, agissent l'un et l'autre de façon sensiblement égale sur les cations des horizons percolés (tabl. 18). *Le fer et l'aluminium ne sont pas du tout mis en solution* puisque les quantités entraînées par chaque percolat acide sont égales ou inférieures à celles des témoins ; ce résultat important est observé même à basse température (0°C), alors que les éluats sont riches en acides phénols maintenus en solution.

Les bases Ca, Mg, K, sont solubilisées avec plus ou moins d'intensité suivant la richesse en cations du milieu et en particulier suivant la teneur en calcium ; en effet dans les milieux pauvres en calcium, le potassium apparaît comme l'élément le plus mobile ; au contraire, dans les milieux riches en Ca, le potassium n'est plus mis en solution par les acides phénols étudiés.

## II. — EXPÉRIENCE « STATIQUE » : ÉVOLUTION DES ACIDES ORGANIQUES MARQUÉS AU $^{14}C$ DANS UN SOL A MULL ET DANS UN SOL A MOR

Par l'utilisation des molécules radioactives, qui permettent de suivre avec exactitude le devenir d'un substrat, on étudie maintenant certains mécanismes de transformation des principaux acides organiques. Il s'agit avant tout de préciser les résultats obtenus dans la première expérience, étant bien entendu que l'interprétation des processus pédogénétiques sera déduite des deux expériences après confrontation de leurs résultats.

En outre, cette expérience, comportant une étude respirométrique, complète la première à un autre point de vue : elle seule permet de mesurer la quantité de $CO_2$ fourni par le sol, pendant un temps donné, en présence d'un poids donné de substrat : dans ce but, les expériences effectuées à l'aide d'acide marqué, ont toujours été doublées par une expérience faite en présence d'acide non marqué.

### 1. — *Matériel et méthodes d'étude*

1. *Sols et horizons utilisés.*

Puisque nous nous proposons de faire une comparaison entre les résultats des deux expériences, le matériel utilisé est évidemment le même.

2. *Méthodes d'étude.*

**2. 1.** *Protocole expérimental.*

Chaque horizon de sol est placé dans un respiromètre qui permet la mesure du $CO_2$ dégagé au cours d'incubations à température et humidité constantes (20°C ; 100 p. 100 de l'humidité équivalente). Les horizons utilisés à l'état frais et tamisés (mailles de 5 mm), reçoivent au départ, soit de l'eau distillée (témoins « respiration endogène »), soit une solution apportant une quantité d'acide équivalente à 2 p. 1 000 (phénols) ou 8 p. 1 000 (aliphatiques) du poids de sol sec à 105°C, enrichie ou non (témoins « $CO_2$ total ») par 10 µCi d'acide radicactif.

TABLEAU 18

*Cations, exprimés en mg, mis en solution par les acides vanillique et* p-*hydroxybenzoïque* (éluats)

| Cations (mg) lessivés par un acide ou par l'eau | | Température d'incubation 20°C | | | Température d'incubation 0°C | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | S. B. less. $A_1$ (mull) | Podzol h. f. | | S. B. less. $A_1$ (mull) | Podzol h. f. | |
| | | | $A_1$ (mor) | $B_h$ | | $A_1$ (mor) | $B_h$ |
| Acide vanillique | Ca | 2,97 | 0,43 | 0,59 | 3,32 | 0,52 | 0,57 |
| | Mg | 0,60 | 0,10 | 0,12 | 0,66 | 0,11 | 0,12 |
| | K | 3,36 | 2,60 | 7,39 | 2,57 | 2,86 | 7,14 |
| | Fe | 1,49 | 0,20 | 0,77 | 1,26 | 0,19 | 0,42 |
| | Al | 1,57 | 0,09 | 1,62 | 1,19 | 0,09 | 0,60 |
| Acide p-hydroxybenzoïque | Ca | 2,78 | 0,14 | 0,15 | 5,83 | 0,16 | 0,14 |
| | Mg | 0,38 | 0,03 | 0,12 | 0,77 | 0,02 | 0,22 |
| | K | 2,2 | 3,40 | 1,96 | 2,42 | 4,87 | 2,09 |
| | Fe | 0,83 | 0,17 | 0,40 | 0,34 | 0,17 | 0,29 |
| | Al | 0,67 | 0,04 | 0,92 | 0 | 0,09 | 0,97 |
| Eau (témoin) | Ca | 2,38 | 0,22 | 0,21 | | | |
| | Mg | 0,41 | 0,05 | 0,09 | | | |
| | K | 2,07 | 1,21 | 1,36 | | | |
| | Fe | 1,58 | 0,31 | 0,57 | | | |
| | Al | 1,60 | 0,19 | 1,33 | | | |

2. 2. *Mesure du dégagement de $CO_2$ (respirométrie).*

Dans le but de déterminer le taux de minéralisation des acides, on dose par voie chimique le $CO_2$ total dégagé par des échantillons « témoins » enrichis en acide non marqué.

D'autre part, on suit la cinétique des processus de décarboxylation, en mesurant la radioactivité du $^{14}CO_2$ dégagé chaque jour, dans un compteur à scintillation liquide Tricarb (GUCKERT *et al.*, 1969) ; puis les désintégrations par minute obtenues (dpm) sont transformées en mg de $^{14}CO_2$ par un calcul simple (ROGER *et al.*, 1969).

Les mesures de $CO_2$ total et de $^{14}CO_2$ sont rendues toutes deux nécessaires, les composés utilisés, à l'exception de l'acide oxalique, n'étant pas uniformément marqués sur tous les carbones, mais uniquement sur le carboxyle (vanillique, *p*-hydroxybenzoïque) ou les carboxyles $C_1$ et $C_5$ (citrique).

2. 3. *Étude de la répartition de la radioactivité.*

En vue d'évaluer les phénomènes d'insolubilisation physico-chimique et d'incorporation biochimique des molécules radioactives à la matière organique, on a déterminé la radioactivité à 0,5, 10 et 21 jours d'incubation dans les fractions suivantes :

— Fraction soluble : acide extractible par l'eau distillée en fin d'expérience (l'acide est identifié par chromatographie et autoradiographie).

— Fraction alcalino-soluble : composés extraits par la soude 0,1 N, séparés en acides fulviques et humiques par précipitation à pH 1.

— Fraction organique non extractible ou humine contenue dans le résidu après les deux extractions ci-dessus.

La radioactivité des fractions solubles est comptée directement dans un scintillateur au dioxanne ; le $^{14}C$ non extractible est mesuré après transformation en $^{14}CO_2$ par combustion.

## 2. — *Résultats*

1. *Taux de minéralisation des acides étudiés* (tabl. 19).

Grâce à la mesure journalière du $CO_2$ total dégagé, on peut aisément déterminer le taux de minéralisation des acides ; pour cela, on rapporte la quantité de $CO_2$ obtenue en 10 jours d'incubation (la respiration endogène étant déduite) à la quantité de $CO_2$ total susceptible de provenir de la minéralisation complète des molécules apportées.

TABLEAU 19

*Taux de minéralisation des acides étudiés obtenus au 10e jour d'incubation et exprimés en p. 100 de l'acide apporté*

| Taux de minéralisation au 10e jour d'incubation | S. B. lessivé $A_1$ (mull) | Podzol h. f. | |
|---|---|---|---|
| | | $A_1$ (mor) | $B_h$ |
| Acide citrique | 29 | 26,4 | 26,6 |
| Acide oxalique | 69,3 | 55 | 54,9 |
| Acide vanillique | 9 | 47,4 | 34,5 |
| Acide p-hydroxybenzoïque | 34 | 41 | 39,1 |

L'ordre de grandeur des taux de minéralisation observés pour chaque acide, à l'exception de l'acide vanillique, varie en général assez peu d'un horizon à l'autre. Le composé le plus minéralisé est incontestablement l'acide oxalique ; puis l'intensité de minéralisation décroît dans l'ordre « acides phénols-acide citrique » (horizons podzoliques) ou « acides *p*-hydroxybenzoïque, citrique et vanillique » (mull).

2. *Vitesse de dégagement du* $^{14}CO_2$ (fig. II).

Le dégagement journalier du $^{14}CO_2$, qui permet d'évaluer la vitesse de décarboxylation des molécules étudiées, montre une divergence d'évolution évidente entre la biodégradation des acides citrique et vanillique d'une part, et celle des acides oxalique et *p*-hydroxybenzoïque d'autre part.

*Les acides citrique et vanillique* subissent dans un horizon $A_1$ de sol brun lessivé (mull) une décarboxylation extrêmement rapide avec un dégagement de $^{14}CO_2$ maxi-

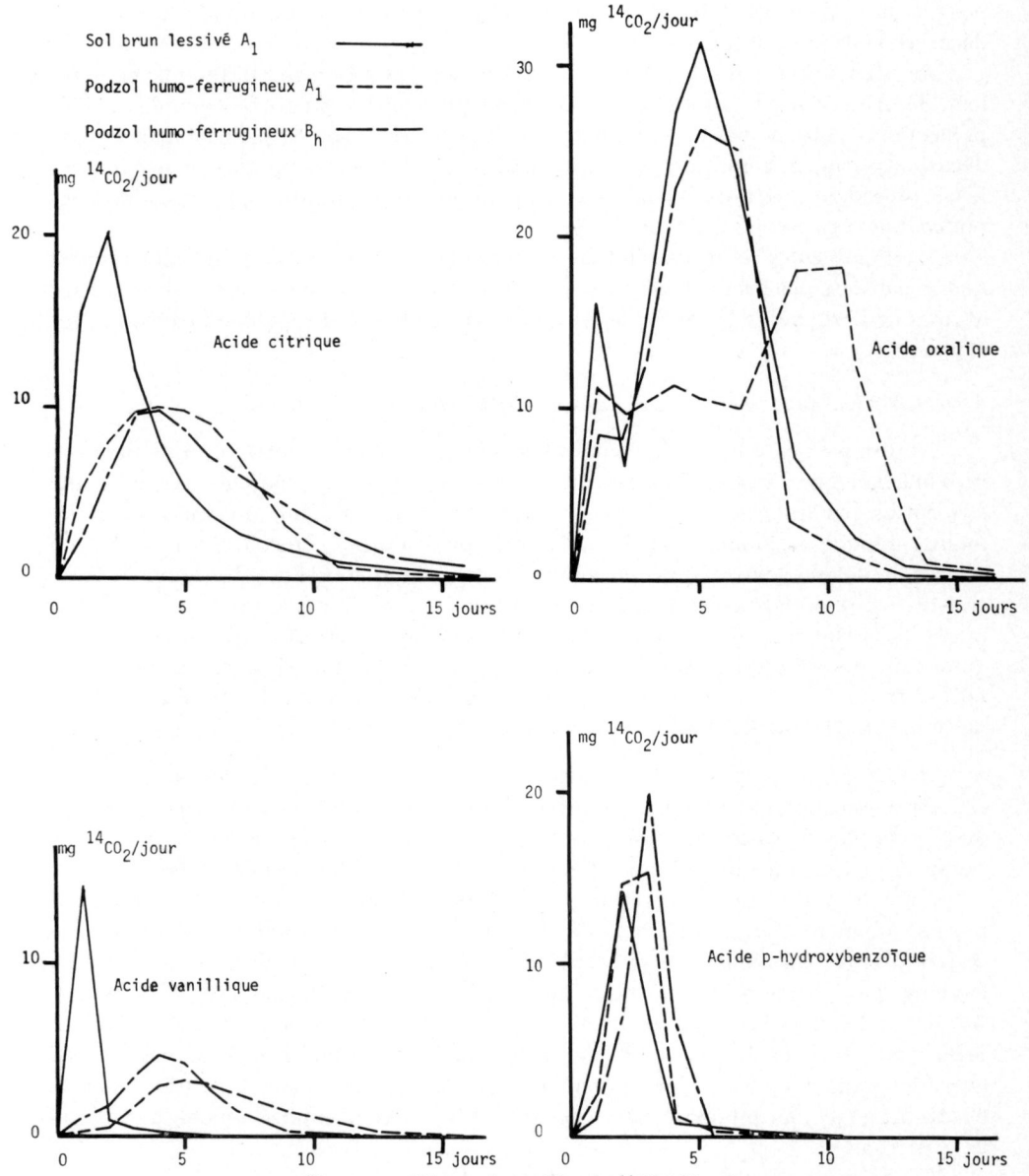



FIG. II. — *Mesure journalière du* $^{14}CO_2$ *dégagé*

mum situé au cours des premières 24 heures (vanillique) ou tout au plus des premières 48 heures d'incubation (citrique). L'acide vanillique constitue certainement l'exemple le plus remarquable : 25 p. 100 et plus de 60 p. 100 de la radioactivité introduite sont dosés sous forme de $^{14}CO_2$ après 1/2 et 24 heures d'incubation. En ce qui concerne l'acide citrique, on peut également affirmer que 60 p. 100 de molécules apportées sont décarboxylées après deux jours d'incubation. A l'inverse, ces mêmes composés ne sont biodégradés dans les horizons podzoliques $A_1$ et $B_h$ que beaucoup plus lentement : maximum de dégagement de $^{14}CO_2$ faible, retardé au 4e et même au 6e jour pour le mor ; dans ces milieux, il faut attendre le 10e jour pour atteindre un taux de décarboxylation de 60 p. 100.

*Le cas des acides oxalique et* p-*hydroxybenzoïque* est tout à fait différent ; en effet leur décarboxylation qui s'effectue de façon plus progressive que celle des acides précédents, n'oppose pas de façon nette les deux types de sol ; de plus, les réactions de décarboxylation affectent un pourcentage de molécules beaucoup plus élevé que dans le cas précédent : les taux constatés atteignent 80 p. 100 (mull) et 90 p. 100 (horizons podzoliques) au 10e jour d'incubation.

L'ensemble des résultats relatifs au dégagement de $CO_2$ total et de $^{14}CO_2$ montre que le carbone des groupements carboxyles est beaucoup plus labile que les autres atomes de carbone de la molécule, et qu'ils sont libérés à un rythme beaucoup plus rapide.

3. *Répartition de la radioactivité dans les différentes fractions du sol.*

Au temps 0 (1/2 heure de contact sol-acide), on peut admettre en première approximation que l'insolubilisation des acides correspond en majeure partie à une adsorption par les argiles ou par les hydroxydes de fer et à une précipitation purement chimique notamment par le calcium (acide oxalique). Au cours de l'incubation à 20°C, le développement plus ou moins intense d'une microflore dégradant chaque substrat (Dommergues et Beck, 1966 ; Bruckert et Dommergues, 1966 ; Beck *et al.*, 1969) favorise non seulement leur minéralisation en $CO_2$ mais certainement aussi l'incorporation du $^{14}C$ à la matière organique. L'étude de la répartition de la radioactivité dans les diverses fractions de sol permet alors d'expliquer certains mécanismes de transformation et d'incorporation d'acides aux matières humiques.

3.1. *Répartition de la radioactivité issue de l'acide citrique* $^{14}C_{1-5}$ (fig. 12).

Au début de l'expérience, le mull et l'horizon $B_h$ insolubilisent respectivement 8 et 3 fois plus de molécules d'acide citrique que le mor. Puis on assiste à une incorporation biochimique du $^{14}C$ qui diffère suivant le type d'horizon considéré.

Dans le mull, l'insolubilisation physico-chimique notée au départ, se poursuit par une augmentation peu marquée de l'incorporation du $^{14}C$ aux fractions humiques ; ce fait résulte, semble-t-il, de la rapide décarboxylation de l'acide citrique, mise en évidence par l'étude respirométrique (le $^{14}C$ est éliminé sous forme de $^{14}CO_2$ : fig. 11).

Dans le mor, l'incorporation du $^{14}C$ s'effectue lentement avec un maximum retardé au 10e jour. En $B_h$ au contraire, ce processus, qui intervient essentiellement entre le premier et le 5e jour d'incubation, progresse au moins deux fois plus vite et atteint au 5e jour un pourcentage deux fois plus élevé que dans le mor (41,7 contre 23,7 p. 100).

Considérons d'autre part la répartition de la radioactivité dans les différentes

fractions humiques. Dans les horizons étudiés, le $^{14}C$ s'intègre tout d'abord aux acides fulviques ; ensuite, du 5e au 10e jour, la radioactivité diminue dans les acides fulviques au profit de l'humine ; enfin, à partir du 10e jour, le taux de $^{14}C$ incorporé à l'humine devient à peu près constant.

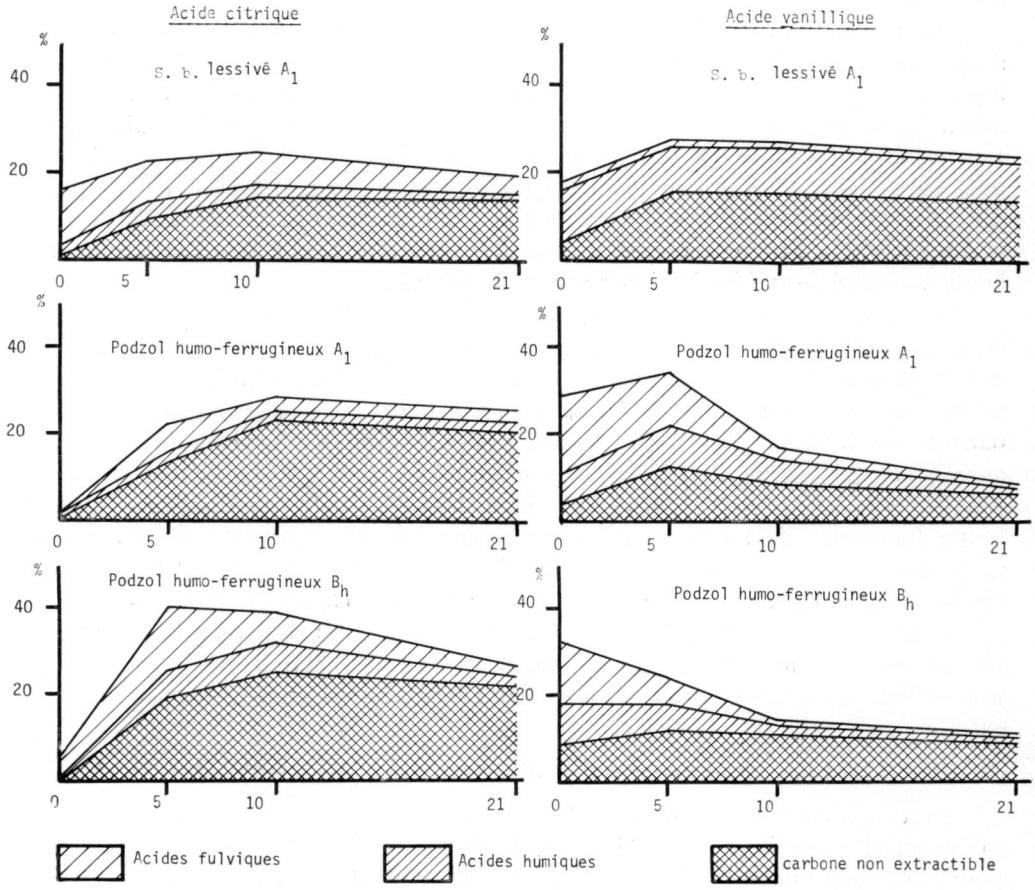



FIG. 12. — *Répartition de la radioactivité dans les fractions humiques en % du $^{14}C$ introduit*

### 3.2. *Répartition de la radioactivité issue de l'acide oxalique $^{14}C_{1-2}$.*

Dès l'enrichissement des échantillons, on observe dans le mull une insolubilisation chimique considérable de l'acide oxalique par le calcium ; ce processus qui affecte 80 p. 100 des molécules introduites, a été vérifié expérimentalement en effectuant une mise en solution de l'oxalate par l'acide sulfurique. Ce phénomène n'est évidemment pas constaté dans le podzol.

Au cours de l'expérience, l'insolubilisation chimique observée dans le mull est relayée par une incorporation biochimique du $^{14}C$ aux matières humiques ; il en est de même dans les horizons podzoliques ; néanmoins, cette incorporation s'effectue de façon moins intense que celle de l'acide citrique.

3.3. *Répartition de la radioactivité issue de l'acide vanillique* $^{14}COOH$ (fig. 12).

Dans les trois horizons, on constate dès le début de l'expérience, l'existence de processus d'insolubilisation physico-chimique et d'incorporation du $^{14}C$ à la matière organique, assez intenses ; mais les tendances évolutives observées diffèrent avec chaque milieu.

Dans le mull, les réactions de décarboxylation mises en évidence au premier jour d'incubation, réduisent d'autant les phénomènes d'insolubilisation de l'acide vanillique au départ (tout au moins en ce qui concerne le groupement carboxyle car il paraît probable que le reste de la molécule s'intègre aux composés humiques) ; à cette rétention succèdent des processus d'incorporation du $^{14}C$ qui s'intensifient jusqu'au 5$^{e}$ jour ; le $^{14}C$ intégré demeure pratiquement constant ensuite (26%) ; de plus, il est important de souligner que cette incorporation des molécules d'acide affecte essentiellement les composés les plus polymérisés (acides humiques et humine) : la radioactivité des acides fulviques restant très faible.

A l'opposé, dans les horizons podzoliques, l'insolubilisation physico-chimique du $^{14}C$ observée en début d'expérience peut s'effectuer avec d'autant plus d'intensité que la décarboxylation de l'acide vanillique est négligeable ; cette insolubilisation est maxima au temps 0 dans le $B_h$, alors qu'elle augmente encore juqu'au 5$^{e}$ jour dans le mor, favorisée par un contact prolongé de l'acide vanillique non transformé avec le sol. A ce stade, la radioactivité localisée de façon prépondérante dans les acides fulviques, correspond presque entièrement à de l'acide vanillique non transformé, faiblement lié aux acides fulviques ; ceci a été vérifié par analyse chromatographique et mesure de la radioactivité de l'acide vanillique extrait des acides fulviques avant et après hydrolyse alcaline (soude 2 N) (Bruckert *et al.*, 1967).

Après le 5$^{e}$ jour d'incubation, le $^{14}C$ des acides fulviques, dosé dans les horizons podzoliques diminue parallèlement à l'augmentation des processus de décarboxylation de l'acide vanillique et au profit de l'humine qui apparaît extrêmement stable ensuite.

3.4. *Répartition de la radioactivité issue de l'acide* p-*hydroxybenzoïque* $^{14}COOH$.

En ce qui concerne ce composé, on note en début d'expérience, une insolubilisation physico-chimique des molécules radioactives moins forte que celle observée pour l'acide vanillique (10 à 20 p. 100). Puis l'évolution de l'acide *p*-hydroxybenzoïque s'avère tout à fait comparable à celle de l'acide vanillique dans le mull ; par contre, dans les horizons podzoliques, le $^{14}C$ ne s'incorpore presque pas, en raison de l'élimination à peu près totale des $^{14}COOH$ sous forme de $^{14}CO_2$ (90 p. 100).

## III. — Discussion : confrontation des expériences dynamique et statique

La confrontation des résultats des deux types d'expériences dynamique et statique doit nous permettre, rappelons-le, de répondre à deux questions : 1° quel est le rôle des acides organiques étudiés dans les processus de migration et de complexation ? Seule la première expérience permettra de répondre à cette question ; 2° quel est le devenir des acides organiques, émanant de la litière et s'infiltrant dans

les sols : quelle est la part qui reste soluble, celle qui est transformée en $CO_2$, et enfin, quelle est celle qui est incorporée durablement aux composés humiques.

Chacune des expériences donne des éléments de réponse incomplets ou imparfaits à cette seconde question : l'expérience dynamique est plus proche des phénomènes naturels, mais elle ne permet pas de mesurer la quantité de $CO_2$ dégagée et, ne comportant pas de carbone radioactif, elle rend les phénomènes d'incorporation plus difficiles à suivre et à interpréter. L'expérience statique par contre, présente deux défauts essentiels : une quantité trop importante d'acide se trouve être mélangée au sol en une seule fois ; en outre, le marquage du carbone n'est pas uniforme et ne porte que sur certains carbones (carboxyles). Mais il est possible en comparant les résultats obtenus dans ces deux expériences, de les corriger l'une par l'autre, et dans ces conditions, d'obtenir des renseignements très précis concernant les processus intervenant *in situ*.

### 1. — *Uniformisation des résultats : concordance des expériences dynamique et statique*

Cette comparaison, pour être rigoureusement valable, nécessite d'exprimer les résultats communs aux deux expériences par rapport à un même élément de référence : il s'agit de la *quantité d'acide retenue par le sol*, sur laquelle l'action des micro-organismes s'est réellement exercée. Cette fraction retenue correspond à l'acide ajouté au total, soit globalement (expérience statique), soit par petites quantités (expérience dynamique), diminué de l'acide élué chaque jour (expérience dynamique) et de l'acide soluble restant en fin d'incubation. Dans ces conditions, il devient possible de déterminer les taux d'acide minéralisé en $CO_2$, insolubilisé et incorporé à la matière organique.

Dans l'expérience statique, les taux de minéralisation des divers composés ont été calculés en fonction de la quantité totale de $CO_2$ dégagé (tabl. 19).

Dans l'expérience dynamique, le pourcentage d'acide transformé en $CO_2$ a été obtenu à l'aide de l'expérience statique, car il est difficile de réaliser cette mesure de façon précise dans une expérience de type dynamique, sans perturber l'écoulement des éluats. L'expérience statique fournit en effet le dégagement journalier de $CO_2$ total obtenu pour chaque horizon enrichi d'une quantité définie d'acide. Il suffit donc de connaître dans l'expérience dynamique, la quantité d'acide retenue par les divers horizons après chaque percolation journalière pour calculer 1° la quantité de $CO_2$ dégagé de ce jour au 10e jour, 2° le pourcentage d'acide minéralisé sous forme de $CO_2$.

Dans les deux expériences, le taux d'acide insolubilisé correspond à l'acide extractible du sol en fin d'incubation par un réactif plus puissant que l'eau (soude 2N, résine $H^+$) ; de même, le taux d'acide « incorporé » aux composés humiques équivaut à l'acide non extractible, donc transformé par des processus d'origine physico-chimique et biologique (taux obtenu par différence).

Comparons maintenant les résultats observés dans les deux expériences (tabl. 20). Les taux de minéralisation des composés étudiés sont de façon constante plus faibles dans l'expérience dynamique que dans l'expérience statique ; en effet, dans la première, l'action des micro-organismes ne s'exerce effectivement pendant 10 jours que sur la quantité d'acide retenue le premier jour de percolation, les molécules retenues par la suite ne subissant cette action que pendant un temps plus court ; ceci explique

TABLEAU 20. — *Comparaison des expériences dynamique et statique* (bilan au 10e jour)

| Bilan au 10e jour concernant chaque acide | | Expérience dynamique | | | Expérience statique | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | S. B. less. $A_1$ (mull) | Podzol h. f. | | S. B. less. $A_1$ (mull) | Podzol h. f. | |
| | | | $A_1$ (mor) | $B_h$ | | $A_1$ (mor) | $B_h$ |
| *Acide citrique* | | | | | | | |
| Fraction éluée | % de l'acide ajouté au total | 0,5 | 65,1 | 31,9 | | | |
| Fraction soluble | | 0 | 3 | 2,7 | 0,5 | 3,2 | 1,7 |
| Fraction retenue | | 99,5 | 31,9 | 65,4 | | | |
| % de la fraction retenue | minéralisé | 20,2 | 16 | 17,9 | 29 | 26,4 | 26,6 |
| | insolubilisé | 1,2 | 5,5 | 8,5 | | | |
| | incorporé | 78,1 | 78,8 | 73,6 | 71 | 73,7 | 73,4 |
| *Acide oxalique* | | | | | | | |
| Fraction éluée | % de l'acide ajouté au total | 0,05 | 45,9 | 30,1 | | | |
| Fraction soluble | | 0 | 3 | 4,1 | 0,4 | 4,9 | 0,3 |
| Fraction retenue | | 99,95 | 51,1 | 65,8 | | | |
| % de la fraction retenue | minéralisé | 39,7 | 29,4 | 39,2 | 69,3 | 55 | 54,9 |
| | insolubilisé | 1 | 2,7 | 7,5 | | | |
| | incorporé | 59,3 | 67,9 | 53,3 | 30,7 | 45 | 45,1 |
| *Acide vanillique* | | | | | | | |
| Fraction éluée | % de l'acide ajouté au total | 2,2 | 33,1 | 24,8 | | | |
| Fraction soluble | | 0,9 | 9,9 | 14,6 | 0,3 | 4,1 | 0,5 |
| Fraction retenue | | 96,9 | 57,0 | 60,6 | | | |
| % de la fraction retenue | minéralisé | 9,6 | 39,8 | 31,3 | 9 | 47,4 | 34,5 |
| | insolubilisé | 1,5 | 20,5 | 18,3 | 1,3 | 18,1 | 13,5 |
| | incorporé | 87,9 | 39,7 | 50,4 | 89,7 | 34,5 | 52 |
| *Acide p-hydroxybenzoïque* | | | | | | | |
| Fraction éluée | % de l'acide ajouté au total | 1 | 14 | 15,1 | | | |
| Fraction soluble | | 0 | 3,4 | 2,2 | 0,3 | 0,5 | 0,6 |
| Fraction retenue | | 99 | 82,6 | 82,7 | | | |
| % de la fraction retenue | minéralisé | 29,3 | 36,6 | 34,2 | 34 | 41 | 39,1 |
| | insolubilisé | 0,2 | 1,7 | 0,8 | 0,1 | 0,9 | 0,7 |
| | incorporé | 70,5 | 61,7 | 65,0 | 65,9 | 58,1 | 60,2 |

également qu'un pourcentage plus important d'acide se retrouve sous une forme insolubilisée dans l'expérience dynamique.

Considérons les taux d'incorporation biochimique des acides aux composés humiques ; on constate que les acides citrique, vanillique et *p*-hydroxybenzoïque fournissent des résultats absolument convergents dans les deux expériences ; cette concordance apparaît avec d'autant plus d'évidence que les réactions de transformation sont plus rapides (cas de l'acide vanillique dans le mull). Pour ces trois composés, il sera donc possible d'expliquer dans une certaine mesure le mécanisme de transformation des quantités d'acide retenues par chaque horizon. Par contre, en ce qui concerne l'acide oxalique, on observe quelques différences entre les deux expériences, divergences qui pourraient provenir de la formation d'oxalate de calcium (mull) ou de fer et d'aluminium (podzol), sels biodégradés plus lentement que l'anion libre par la microflore tellurique (DOMMERGUES et BECK, 1966).

### 2. — *Migration des acides organiques*

Dans le tableau 20, on a fait figurer la fraction d'acide élué des colonnes de sol, exprimée en pour cent de l'acide ajouté au total ; ceci dans le but bien précis de rappeler et de souligner que la migration des acides organiques ne peut avoir lieu dans un sol brun lessivé, car ces produits disparaissent dès l'horizon $A_1$ (mull) dans lequel ils sont totalement retenus et transformés. A l'opposé, les acides organiques traversent facilement les horizons A des podzols et parviennent dans les horizons d'accumulation $B_h$ et $B_{fe}$. Cette migration se réalise aussi bien dans nos expériences que dans les profils en place, comme en témoignent des mesures antérieures (BRUCKERT, 1966 ; BRUCKERT et JACQUIN, 1966 ; BRUCKERT *et al.*, 1967). En $B_h$, les acides sont fortement retenus, mais cette insolubilisation n'est pas totale et une fraction non négligeable des composés étudiés peut migrer jusqu'en $B_{fe}$.

On constate également, par comparaison des taux d'acide élué et des vitesses de migration, mises en évidence graphiquement (fig. 5 et 8), que les acides aliphatiques migrent plus rapidement que les acides phénols.

Ces processus caractéristiques des sols filtrants recevant une pluviométrie intense, atteindraient une amplitude beaucoup plus grande encore dans les régions à climat froid (sols cryptopodzoliques de montagne ; sols gris forestiers en climat boréal) ; dans ce cas, les acides organiques complexants, protégés de l'action des micro-organismes par une température inférieure à 0°C, seraient conservés et migreraient vers les horizons d'accumulation à la fonte des neiges. Cette évolution en fonction de la température serait très accusée pour l'acide *p*-hydroxybenzoïque, lequel pourrait migrer seulement en hiver.

### 3. — *Lessivage des cations*

Les résultats de l'expérience dynamique précisent l'action des acides organiques les plus caractéristiques des sols vis-à-vis des éléments minéraux intervenant dans les processus pédogénétiques.

Les quatre composés étudiés mettent en solution les bases Ca, K, Mg et l'entraînement du calcium s'avère préférentiel quand le complexe absorbant est bien pourvu en cet élément (sol brun lessivé). Les acides phénols (vanillique et *p*-hydroxybenzoïque)

ne solubilisent ni le fer, ni l'aluminium ; cette absence de complexation pourrait provenir de la position éloignée du radical COOH carboxylique par rapport au groupement OH phénolique (MORTENSEN, 1963 ; SCHNITZER, 1969). A l'opposé, les acides aliphatiques (citrique et oxalique) mobilisent de grandes quantités de fer et d'aluminium, en raison de leur pouvoir complexant très élevé ; de plus, leurs complexes à base d'aluminium pourraient migrer plus bas dans le profil de sol que leurs complexes à base de fer, car on dose de façon permanente plus d'aluminium que de fer dans tous les éluats.

Les acides aliphatiques jouent donc un rôle important dans les processus de podzolisation, alors que les acides phénols n'interviennent pas dans l'entraînement des sesquioxydes ; mais rien ne s'oppose à une action complexante par des composés plus polymérisés fournis aux dépens de ces acides simples aromatiques ou aliphatiques (SCHNITZER, 1969) : nous-mêmes avons pu montrer, à l'aide des expériences décrites au chapitre I, paragraphe II, que ces polymères exerçaient en fait une action non négligeable sur la migration des cations lourds, quoique cette action soit très inférieure comparée à celle des acides aliphatiques.

### 4. — *Mécanisme d'insolubilisation des complexes : participation des acides organiques à la formation des composés humiques*

Si le mécanisme d'insolubilisation des complexes dans les sols a été abordé par de nombreux chercheurs, il faut reconnaître que ces derniers se sont presque toujours placés exclusivement au point de vue physico-chimique et l'aspect biologique de la question a été négligé. Pourtant, dès 1956, CRAWFORD mettait l'accent sur cet aspect du problème et des expériences très précises permettaient d'affirmer ultérieurement que les processus d'insolubilisation d'origine biologique étaient au moins aussi importants que les processus d'origine physico-chimique (BRUCKERT et DOMMERGUES, 1968) ; les premiers cités ont pour résultat de provoquer la libération des cations complexés, qui précipitent à l'état d'hydroxyde (TEN, 1967) ; ces éléments minéraux constituent à leur tour des agents insolubilisants extrêmement puissants vis-à-vis des composés organiques plus ou moins condensés (BELOUSOVA et TONGONOGOV, 1968 ; SCHNITZER, 1969 ; MCKEAGUE et ARNAUD, 1969).

Comme nous le verons ci-dessous, en tenant compte des résultats présentés au tableau 20 ou obtenus dans l'expérience statique, l'action de la microflore se manifeste par des processus de décarboxylation et de minéralisation partielle (sous forme de $CO_2$) de l'agent complexant, le reste de la molécule étant disponible pour participer à la formation des matières humiques.

Dans tous les cas, le mécanisme de transformation des acides aliphatiques et phénols étudiés, débute par une réaction de décarboxylation qui a déjà été notée par FLAIG (1965) pour les acides phénols, mais la vitesse de cette dégradation varie selon le composé et le sol envisagé ; elle peut être immédiate et affecter d'emblée un pourcentage élevé de molécules (cas de l'acide vanillique dans le mull) ou bien s'effectuer de façon plus progressive (cas de l'acide *p*-hydroxybenzoïque dans les trois horizons). Le phénomène s'accompagne d'un mécanisme d'incorporation à la matière organique, soit de molécules entières, y compris le $^{14}COOH$, soit du reste des molécules dégradées.

1. *Pour les acides citrique et* p-*hydroxybenzoïque,* le taux d'incorporation rapporté à la quantité d'acide retenue (tabl. 20) est toujours largement supérieur au taux de minéralisation en $CO_2$ et se situe autour de 65 p. 100 (*p*-hydroxybenzoïque) ou 75 p. 100 (citrique) quel que soit l'horizon utilisé. Néanmoins, ce bilan global résulte d'un mécanisme de transformation quelque peu différent suivant le sol et le composé considéré.

Dans un sol brun lessivé, la transformation des acides citrique et *p*-hydroxybenzoïque s'effectue avec décarboxylation de 75 à 80 p. 100 des molécules, le reste de la radioactivité étant incorporé dans l'humine. Au contraire, dans un podzol, la décarboxylation intervient de façon beaucoup plus progressive en raison de la faible activité biologique de ce milieu et s'accompagne d'une différence notable d'évolution entre les deux acides, en ce qui concerne leur incorporation à la matière organique :

— dans le cas de l'acide citrique, on dose dans les composés humiques, jusqu'à 40 p. 100 ($B_h$) de la radioactivité introduite;

— à l'inverse, dans le cas de l'acide *p*-hydroxybenzoïque, le processus d'incorporation du $^{14}C$ est faible, 90 p. 100 des molécules d'acide étant décarboxylées en fin d'incubation ; pour ce composé, on peut donc admettre que le noyau cyclique non marqué, constitue presque la seule partie de la molécule incorporée de façon importante aux composés humiques dans l'horizon $B_h$.

2. *En ce qui concerne l'acide vanillique,* il convient de rappeler, avant d'exposer de façon détaillée le mécanisme de transformation de ce composé, l'extrême divergence d'évolution globale observée entre les milieux lessivés et podzoliques (tabl. 20) :

— dans le mull, l'acide vanillique subit une minéralisation minimum (9 p. 100) alors qu'il est largement incorporé (90 p. 100) sous une forme non extractible même après hydrolyse alcaline ;

— au contraire, dans les horizons podzoliques, la transformation de l'acide vanillique en polymères est beaucoup plus faible (35 p. 100 mor ; 50 p. 100 $B_h$) et s'accompagne d'un dégagement plus élevé mais plus progressif de $CO_2$.

Une telle opposition résulte, semble-t-il, d'un mécanisme de transformation et d'insolubilisation des molécules d'acide vanillique totalement différent entre les deux types de sols ; celui-ci est parfaitement mis en évidence par l'analyse chromatographique des composés humiques avant et après hydrolyse alcaline (soude 2 N), notamment des acides fulviques et de l'humine.

*Sol brun lessivé : insolubilisation biologique.*

On assiste dans le mull, à une décarboxylation extrêmement rapide de 70 p. 100 des molécules d'acide vanillique et simultanément, à l'incorporation sous forme de molécules « entières » de 30 p. 100 de la radioactivité introduite ; mais cette fraction qui s'intègre essentiellement à l'humine et pas du tout aux acides fulviques, subit une refonte totale ; en effet, l'hydrolyse alcaline ne libère sous forme d'acide vanillique que 18 p. 100 seulement de la radioactivité de l'humine. On peut en déduire que le reste de la radioactivité provient de molécules d'acides fortement intégrées à l'humine et probablement transformées par voie biochimique. De plus, le taux de $^{14}C$ incorporé étant stable au cours des 21 jours d'incubation, on peut considérer que l'acide intégré est en grande partie soustrait à la biodégradation microbienne.

*Podzol humo-ferrugineux : insolubilisation chimique.*

A l'opposé, dans les horizons podzoliques, les processus de décarboxylation d'origine biologique sont beaucoup plus lents et on assiste en premier lieu à une insolubilisation chimique de l'acide vanillique localisée essentiellement dans les acides fulviques ; plus tard, au cours de l'incubation, la quantité d'acide vanillique lié à ces composés peu polymérisés, diminue par minéralisation en $CO_2$ (décarboxylation) et par intégration à l'humine. Mais en hydrolysant cette matière humique stable (NaOH 2 N), on peut libérer sous forme de molécules d'acide vanillique non transformées, 72 p. 100 (mor) et 37 p. 100 ($B_h$) de la radioactivité de l'humine. On assiste donc dans le mor, et tout au moins au début de l'incubation dans le $B_h$, à un processus d'insolubilisation essentiellement d'origine chimique où les sesquioxydes joueraient un rôle important ; en effet, si on traite l'humine de l'horizon $B_h$ par HCl N (méthode Tiurin), on extrait simultanément du fer, de l'aluminium et des matières humiques combinées à ces cations : les concentrations obtenues en solution sont de 1 700 p.p.m. (Fe), 700 p.p.m. (Al), 1 600 p.p.m. (C) et par ce traitement on libère sous forme d'acide vanillique, 30 p. 100 de la radioactivité de l'humine. Par comparaison des traitements sodique et chlorhydrique, on peut dire que l'acide vanillique non transformé présent dans l'humine, se trouve, pour les 4/5 (80 p. 100 environ) insolubilisé par les sesquioxydes et pour 1/5 lié à l'humine. Néanmoins, dans l'horizon $B_h$, un deuxième processus de transformation d'origine microbiologique cette fois, pourrait succéder progressivement au premier phénomène (libération différée de $CO_2$).

Les divergences d'évolution constatées entre sols à mull et sols à mor sont encore mises en évidence quand on compare l'activité spécifique de l'acide vanillique introduit en début d'expérience et l'activité spécifique de l'acide vanillique libéré par hydrolyse de l'humine : les valeurs mesurées, exprimées en μCi/mM, varient de 9,5 (valeur initiale) à 7,5 (mull), 2,2 (mor) et 2,8 ($B_h$). Ces chiffres prouvent que l'acide vanillique préexistant dans les horizons podzoliques et libérable par hydrolyse alcaline (BRUCKERT *et al.*, 1967), vient s'ajouter à l'acide radioactif introduit.

Soulignons enfin que l'évolution des acides vanillique et *p*-hydroxybenzoïque constatée dans ces expériences corrobore de façon très exacte les observations faites par JACQUIN (1963) concernant la composition phénolique des composés humiques : en effet, l'acide vanillique, à l'inverse de l'acide *p*-hydroxybenzoïque, constitue un élément dissociable, caractéristique des acides humiques des podzols.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

### 1. — *Objet de ce travail*

Ce travail a essentiellement pour but de préciser le rôle des composés organiques solubles émanant des litières, dans les processus de complexation et de migration des cations lourds (notamment fer et aluminium) dans les sols à forte activité biologique (sols à mull) ou dans les sols à faible activité biologique (podzols).

Le premier problème à résoudre consistait à identifier les substances complexantes existant dans les litières : une étude bibliographique, complétée par certaines expé-

riences de laboratoire, nous a convaincu que les substances les plus actives étaient les acides organiques, surtout les acides aliphatiques, dans une moindre mesure certains acides aromatiques, et enfin, certains « polymères » phénoliques plus ou moins colorés, que l'on peut extraire des litières en décomposition et des horizons $A_0$ ; mais nous avons pu montrer que ces polymères n'ont en fait qu'une action complexante réduite, de l'ordre du 1/3 ou du 1/4 de celle des anions simples : pour cette raison, notre étude a surtout porté sur ces derniers.

Mais si ces composés organiques acides constituent effectivement les « agents vecteurs » des cations mobilisés dans les sols acides, lorsqu'ils sont à l'état soluble, inversement lorsqu'ils s'insolubilisent, ils constituent la matière première de la plus grande partie des composés humiques des sols, ceux qui précisément résultent de l'insolubilisation et de la polymérisation des composés solubles (on sait qu'il existe dans certains sols très actifs, une autre source de composés humiques, la transformation rapide de substances insolubles dès le départ, lignine par exemple ; mais leur étude n'a évidemment pas sa place ici).

L'étude des mécanismes d'insolubilisation des complexes organo-minéraux nous conduira donc obligatoirement à celle de l'humification ; nous établirons un parallèle à ce point de vue, entre l'humification des sols à mull et celle des sols podzoliques à mor : dans les premiers, l'humification, essentiellement biologique, intervient par insolubilisation quasi immédiate des complexes en $A_1$, alors que dans les seconds, il s'agit d'une *insolubilisation différée* intervenant en B, par une voie surtout chimique.

### 2. — *Expériences de terrain : comparaison de l'évolution des acides organiques dans les sols à mull et dans les sols à mor*

On sait que les litières dites « améliorantes » (en général génératrices d'un mull) sont en fait, à l'état frais, plus riches en acides organiques complexants que les litières « acidifiantes » ou plutôt « podzolisantes » ; or, toutes les observations antérieures tendent à montrer que les phénomènes d'entraînement par complexation sont pratiquement nuls sous les premières, alors qu'ils paraissent importants sous les secondes.

Il convenait donc de lever cette apparente contradiction en montrant le rôle capital des processus de « dégradation » biologique de substances complexantes, processus très rapide dans les litières du mull, beaucoup plus lent dans les litières du mor. Une comparaison entre différents types de sol montre que les anions complexants solubles ont pratiquement disparu des horizons minéraux des sols à mull, (sol brun lessivé, sol brun acide même), alors qu'ils persistent en quantité non négligeable à l'état soluble dans les horizons profonds des sols podzoliques, et cela en quantité d'autant plus forte que la podzolisation est plus accentuée. Par des mesures précises effectuées sur le terrain sur deux stations types (sol brun lessivé à mull, podzol humo-ferrugineux), nous avons effectué un *bilan saisonnier* de la « production » (à l'ha) des divers acides organiques complexants, et de leur disparition (ou au contraire, conservation) dans les horizons $A_1$ : en intégrant les courbes obtenues, il nous a été possible de montrer que l'évolution des acides aliphatiques et aromatiques issus des litières s'opposait entièrement dans les mull et dans les mor ; *la quasi-totalité de ces composés est biodégradée, dans la litière même et au sein des horizons $A_1$ dans les mull* ; au contraire, une fraction importante filtre au travers des horizons $A_0$ et $A_1$ du podzol, et atteint ainsi les horizons $A_2$ et B.

Une expérience simple d'incubation *in vitro* nous a permis de vérifier et d'expliquer ces différences : alors que les éléments complexants *préexistent* dans les litières du mull, et qu'une fois biodégradés en $A_1$, ils ne réapparaissent plus, dans le mor, on observe une *production continue* de ces éléments, au cours de l'année, au sein de l'horizon $A_0$, de sorte que le profil est alimenté en éléments complexants, non plus saisonnièrement (à la chute des feuilles par exemple) mais de façon permanente.

3. — *Expériences de laboratoire : migration et insolubilisation des complexes*

Les expériences que nous avons pratiquées au laboratoire visaient un double but : d'une part obtenir des précisions sur le pouvoir complexant des divers acides organiques émanant des litières, d'autre part, essayer de mettre en évidence, au moins partiellement, le mécanisme des processus d'insolubilisation dans les divers milieux étudiés.

Les études faites sur le terrain, ainsi que celles d'autres chercheurs (JACQUIN, 1963) ayant permis d'identifier avec une quasi-certitude la nature des composés les plus actifs, tant dans l'humification que dans la complexation, nos expériences ont été faites à l'aide de solutions de ces produits ; les acides citrique, oxalique, vanillique et *p*-hydroxybenzoïque ont été sélectionnés ; si nous utilisons des concentrations en acides un peu plus élevées que celles qui existent dans le sol, le rapport entre acides aliphatiques et acides aromatiques se situe dans des valeurs très proches de celles observées *in situ*.

On a étudié leur action sur trois horizons types : $A_1$ d'un sol brun lessivé (mull), $A_1$ (mor) et $B_h$ d'un podzol. Deux types d'expériences ont été effectuées : l'une qualifiée de « dynamique », comportait une « percolation » quotidienne de petites quantités de solutions d'acides à travers des colonnes de ces trois horizons — pour le podzol, on a également procédé à une percolation à travers les deux horizons $A_1$ et $B_h$ superposés ; ces expériences effectuées tantôt à 0°C, tantôt à 20°C, ont permis de dégager, par comparaison, l'importance des phénomènes biologiques. L'autre type d'expérience est « statique » : il s'agit d'incubations (durée 21 jours) des mêmes horizons enrichis en un des éléments étudiés, dont une partie du carbone était marquée ($^{14}C$). Par respirométrie d'une part (mesure du $^{14}CO_2$ émis quotidiennement), par étude de l'incorporation du $^{14}C$ dans les différentes fractions humiques d'autre part, on a pu suivre l'évolution de l'élément introduit.

Les résultats des deux types d'expériences ont fait l'objet d'une comparaison minutieuse et ont été complétés par divers essais chimiques, tels que l'hydrolyse ménagée des composée humiques, à l'aide de NaOH 2 N, ce qui a permis de préciser les formes d'insolubilisation des composés introduits.

Ces expériences ont permis de mettre en évidence les faits suivants :

1° *Migration des sesquioxydes.*

Seuls les acides aliphatiques étudiés (oxalique et citrique) offrent un pouvoir complexant marqué, à l'inverse des deux acides aromatiques ; ceci s'explique par le fait que le pouvoir complexant n'est important que s'il existe, disposés côte à côte sur la molécule, deux groupements fonctionnels au moins (carboxyliques ou phénoliques), *ce qui n'est pas le cas des acides aromatiques libérés au cours de la décomposition des litières.*

On peut donc en déduire que les acides phénols ne jouent en fait qu'un faible rôle dans la migration des sesquioxydes, l'activité la plus grande à cet égard étant dévolue aux acides aliphatiques, surtout citrique et oxalique.

Comme on pouvait s'y attendre, les expériences de laboratoire ont confirmé celles effectuées sur le terrain ; l'insolubilisation (compliquée d'une biodégradation partielle) de tous les complexes est quasi-totale dans un mull ; à l'opposé, elle s'avère très faible dans les horizons $A_1$ des podzols, ce qui leur permet de migrer jusqu'aux horizons B. En $B_h$ les processus d'insolubilisation sont importants mais il convient de remarquer qu'une partie des éléments complexants reste soluble, ce qui permet d'expliquer leur insolubilisation plus « étalée » dans l'espace et la formation de l'horizon $B_{fe}$, également riche en composés organiques de précipitation.

2° *Insolubilisation des complexes : formation des composés humiques.*

Ainsi les acides organiques solubles originaires des litières s'intègrent aux composés humiques à un rythme plus ou moins rapide au fur et à mesure qu'ils s'insolubilisent.

Pour trois au moins des acides étudiés, une fraction importante des molécules ajoutées s'incorpore de façon durable aux composés humiques des différents horizons étudiés : la fraction transformée en $CO_2$ par minéralisation biologique reste minoritaire ; la fraction non minéralisée et incorporée aux composés humiques (au bout de 10 jours d'expérience « dynamique » ou « statique ») représente 75 p. 100 environ de l'acide citrique retenu, 65 p. 100 environ de l'acide *p*-hydroxybenzoïque, cette proportion variant peu suivant les horizons étudiés. Pour l'acide vanillique au contraire, la fraction incorporée sous forme stable aux composés humiques, diffère suivant l'horizon, et représente 35 p. 100 de la fraction retenue dans l'horizon $A_1$ du mor, 50 p. 100 pour le $B_h$, 90 p. 100 dans l'horizon $A_1$ du mull : nous expliquerons ces divergences par le mode d'insolubilisation qui lui-même paraît très différent dans chacun de ces horizons.

En ce qui concerne l'acide oxalique, la proportion qui n'est pas minéralisée est évidemment beaucoup plus faible, mais il n'a pas été possible de la déterminer avec précision, la lenteur de la minéralisation des oxalates interdisant toute comparaison valable entre l'expérience statique et l'expérience dynamique.

L'incorporation des acides organiques aux acides humiques, porte soit sur la molécule entière, celle-ci gardant son intégrité primitive (comme le montre la radioactivité des composés humiques obtenus et l'étude de leurs produits d'hydrolyse), soit sur une molécule transformée et amputée du ou des groupements carboxyles ; la comparaison entre les expériences « statiques » effectuées à l'aide d'acides marqués (sur le carbone du carboxyle) ou non marqués, montre en effet que le groupement carboxyle COOH est un point faible de la molécule, toujours éliminé de façon prioritaire ; le reste de la molécule est au contraire biodégradé de façon plus progressive ce qui lui donne éventuellement le temps de s'intégrer à des molécules humiques plus complexes (noyau des acides vanillique et *p*-hydroxybenzoïque).

Le processus d'incorporation semble passer par des phases semblables, quel que soit l'acide étudié ; il y a d'abord incorporation plus ou moins fugace (parfois très fugace, cf. l'acide vanillique dans le mull) dans les acides fulviques peu polymérisés, mais cette forme paraît instable : tantôt elle évolue vers des composés plus polymé-

risés, par exemple, humine (cas de l'acide citrique), tantôt elle est au contraire minéralisée en $CO_2$ (cas de l'acide vanillique dans les horizons podzoliques).

3° *Insolubilisation biologique et chimique.*

Si on compare entre eux, les horizons $A_1$ du mull et $B_h$ du podzol, les processus d'insolubilisation des acides entraînés depuis les litières semblent être très différents.

A titre d'exemple, nous avons comparé l'évolution de l'acide vanillique dans ces deux horizons, car pour cet acide, les différences sont spectaculaires et de ce fait, s'interprètent plus aisément.

*Au sein de l'horizon $A_1$ du mull* : on est frappé par l'extrême rapidité de transformation de l'acide ajouté : 1) la décarboxylation d'environ 70 p. 100 des molécules intervient dans un délai extrêmement court (quelques heures) ; 2) la molécule est incorporée de façon quasi immédiate dans des composés humiques très polymérisés et qui, d'emblée, apparaissent stables vis-à-vis de la biodégradation microbienne ; 3) l'acide vanillique n'est pas récupérable (ou très faiblement) par hydrolyse ménagée : tout cela indique une refonte totale au sein des molécules organiques très complexes ; ce fait joint à la rapidité du processus de décarboxylation, montre une action prépondérante des *facteurs biologiques* dans ces transformations.

*Dans l'horizon $B_h$ du podzol*, les phénomènes observés s'opposent aux précédents : 1) l'insolubilisation se produit de façon plus progressive et elle *précède* tout processus de décarboxylation ; 2) la forme acide fulvique qui domine au début est peu stable, et elle disparaît d'une part par décarboxylation, d'autre part par intégration à des molécules complexes (humine) qui sont plus résistantes à la biodégradation microbienne ; 3) l'hydrolyse ménagée des composés humiques montre une transformation biochimique moins poussée puisque 40 p. 100 environ de l'acide vanillique incorporé est récupérable par ce procédé ; toutes ces observations font aussitôt penser à une *insolubilisation chimique*, les processus biologiques étant, sinon absents, tout au moins subordonnés. Le rôle du fer et de l'aluminium dans cette insolubilisation chimique, a pu être mis en évidence par un simple traitement de l'humine à HCl dilué qui libère du fer et de l'aluminium en quantité importante relativement au carbone mis en solution.

4° *Podzolisation « climatique ».*

Ces expériences permettent aussi de formuler une conclusion d'ensemble concernant la pédogenèse en climat atlantique et en climat boréal ou subalpin. En climat atlantique, c'est-à-dire en climat doux et humide, on peut affirmer que le processus de « podzolisation » est bien lié à la formation d'un humus de type « mor », à faible activité biologique, ce qui permet la persistance des agents solubles complexant le fer et l'aluminium et leur migration dans le profil. Mais il n'en est pas nécessairement de même en climats froids, tels que les climats boréaux et subalpins : les comparaisons que nous avons effectuées, concernant la persistance des anions complexants solubles, à une température voisine de zéro degré, cela même dans le mull biologiquement actif, prouve que la podzolisation peut avoir lieu dans de telles conditions, sous ces climats ; cela explique l'existence de sols podzolisés à mull, en montagne d'une part (sols cryptopodzoliques d'altitude) et en climat boréal d'autre part (sols gris forestiers en U. R. S. S.).

### 4. — *Essai d'interprétation de la formation des horizons $B_h$ et $B_{fe}$ des podzols*

Bien que ceci dépasse le cadre de ce travail, il est possible, en confrontant les résultats de nos expériences avec les données de la littérature à ce sujet, de formuler certaines hypothèses concernant la formation des horizons $B_h$ et $B_{fe}$ des podzols.

Nous avons montré le rôle essentiel du fer et de l'aluminium dans les processus d'insolubilisation des composés organiques simples (acide vanillique) ou polymérisés (chapitre I, § II) en B. Or, plusieurs auteurs ont étudié l'influence des variations quantitatives des cations complexés dans les processus d'insolubilisation des complexes : lorsque le rapport cation/anion dépasse un certain seuil, l'ensemble précipite (SCHNITZER, 1969) ; nous-même avons obtenu ainsi la précipitation *progressive* d'un complexe préparé à l'aide de polymères, par addition de quantité croissante de $FeCl_3$, à pH 2,5. Mais il existe une autre forme de précipitation beaucoup plus brutale, par adsorption de l'anion (ou du polymère soluble) sur de l'hydrate de fer colloïdal libre ; dans la solution précédente, il suffit d'élever le pH à 4,5, ce qui provoque, dans une première phase, une insolubilisation de $Fe(OH)_3$ seul, pour obtenir, au-delà d'un seuil critique, une précipitation brutale et instantanée du polymère (coprécipitation), cela pour une quantité de 5,5 milliéquivalents de fer par gramme de carbone. Or, ce processus existe certainement dans les horizons B des podzols : la décarboxylation des agents complexants intervenant en B, a en effet pour résultat de libérer une partie du fer complexé à l'état d'hydrate ferrique libre ; cet hydrate ferrique précipite à son tour le reste du complexe ; le rôle des hydrates de fer ou d'aluminium « libres » a pu être mis en évidence, rappelons-le, par certains auteurs tels que MARTIN et REEVE (1960) ou KING et BLOOMFIELD (1966). Les hydrates ferriques insolubilisent en priorité les « polymères » solubles, qui à leur tour adsorbent comme nous l'avons montré, une partie des anions solubles (acide vanillique et acide citrique) ; l'ensemble forme les composés humiques foncés qui caractérisent le $B_h$. D'après ce que nous venons de dire, dans ces composés humiques, les cations entraînés se trouvent très probablement sous deux formes : une forme encore à l'état complexé, et une forme libre à l'état d'hydroxydes ferriques et alumineux.

D'autre part, nous avons vu que la totalité des anions solubles ne précipitait pas en $B_h$ ; une partie atteint donc l'horizon inférieur $B_{fe}$ ; de même, certains polymères de poids moléculaire peu élevé, déplacés de leurs combinaisons insolubles avec le fer par les acides aliphatiques, précipiteraient de façon plus étalée dans l'espace (BRUCKERT et JACQUIN, 1969 *b*). Il s'ensuit que les composés organiques qui atteignent l'horizon $B_{fe}$ se trouvent sous une forme initialement peu polymérisée, c'est-à-dire à l'état d'acides fulviques. Néanmoins, il ne s'agit là que d'acides fulviques « jeunes » se trouvant à une phase initiale et qui sont, nous l'avons vu, peu stables : ils évoluent par maturation bioclimatique (catalysée aussi par la présence des hydroxydes de fer et d'aluminium) vers les formes faiblement polymérisés que SCHNITZER et SKINNER (1964) ont mis en évidence dans les horizons B des podzols.

Ce mécanisme explique la superposition des deux horizons illuviaux $B_h$ foncé, $B_{fe}$ plus clair qui caractérise les podzols humi-ferrugineux : l'horizon $B_h$ formé surtout par la précipitation et l'évolution consécutive des polymères contient surtout des composés humiques et de l'humine à grosses molécules très colorées ; l'horizon $B_{fe}$

est essentiellement formé d'acides fulviques, clairs, à molécules plus petites, résultant d'une polymérisation modérée des acides organiques solubles.

*Reçu pour publication en août 1970.*

## REMERCIEMENTS

Avant d'exposer les résultats de nos recherches, nous tenons à souligner que nous avons rencontré à Nancy des conditions de travail extrêmement favorables : en effet, plusieurs équipes, dirigées par M. le Pr DUCHAUFOUR, consacrent leurs efforts à l'étude des sols lessivés et podzoliques de Lorraine et des Vosges.

Nous exprimons en premier lieu notre respectueuse reconnaissance à M. le Pr DUCHAUFOUR, directeur du Centre de Pédologie du C. N. R. S. et professeur à la Faculté des Sciences de Nancy, qui nous fait l'honneur de présider notre jury, après avoir largement contribué à notre formation de chercheur par ses conseils et son enseignement caractérisés par un esprit de synthèse remarquable.

Il nous est agréable d'adresser nos sentiments de vive gratitude à M. JACQUIN, professeur à la Faculté des Sciences et à l'École nationale supérieure agronomique de Nancy, chef de la Section de Biochimie des sols au Centre de Pédologie, qui n'a cessé de suivre nos investigations et a su les orienter de façon décisive.

Nos remerciements vont à M. METCHE, maître de conférences à la Faculté des Sciences de Nancy, pour nous avoir fait profiter de ses connaissances, indispensables à l'interprétation des processus biochimiques, et à M. DUPUIS, professeur à la Faculté des Sciences de Poitiers, pour l'intérêt qu'il a témoigné à nos travaux en acceptant de faire partie de notre jury.

Nous tenons à remercier de façon toute spéciale M. le Pr FLAIG, directeur de l'Institut de Biochimie du Sol de Braunschweig, pour nous avoir fait parvenir plusieurs acides phénols de synthèse marqués au $^{14}C$.

Nous remercions également M. DOMMERGUES, directeur de recherche et chef de la section de Microbiologie au Centre de Pédologie, et M. SOUCHIER, ingénieur de recherche et chef de la section de Chimie des Sols, qui ont toujours entretenu à notre égard un climat de franche collaboration.

Enfin, nous exprimons notre sincère reconnaissance à tous nos camarades et au personnel technique et administratif du Centre de Pédologie et de l'École nationale supérieure agronomique de Nancy : à tous, nous adressons nos remerciements et plus particulièrement à M. GUCKERT, assistant à la Faculté des Sciences de Nancy, et à M. ROGER, attaché de recherche à l'O. R. S. T. O. M., qui nous ont permis de bénéficier de leur mise au point concernant l'utilisation des radioisotopes, effectuée avec la contribution technique de Mme SCHOULER ; à Mme BECK, pour avoir adapté à nos expériences plusieurs techniques destinées à l'étude des micro-organismes ; à MM. ROUILLER et JEANROY, sans lesquels il ne nous aurait pas été possible de réaliser un grand nombre d'analyses de série.

## SUMMARY

### THE EFFECT OF SOLUBLE ORGANIC COMPOUNDS ON PEDOGENESIS IN AN ACID ENVIRONMENT

### II. — LABORATORY EXPERIMENTS ON THE MODE OF ACTION OF THE COMPLEX-FORMING AGENTS

The results of laboratory experiments showed the following pedogenetic mechanisms :

*In soils with mor humus*, the organic acids remain in the litter, leach through the A horizons and penetrate into the B horizons of the podzols, but only the aliphatic acids play a major role in the complex-formation and transport of the Fe and Al cations. These same acids also facilitate the migration of polymers produced in the litter. In the spodic horizons all the acids investigated, both aliphatic and aromatic, were first rendered insoluble by a mainly *chemical* process, then partly mineralized to carbon dioxide and, partly incorporated into more or less polymerized humic compounds (a major proportion).

*In soils with mull humus*, strong biological activity combined with the constant presence of exchangeable cations renders the acids insoluble and transforms them *in situ* (in the litter and mull) by *biochemical* interaction into highly polymerized humified compounds. *All migration of complexes* is inhibited.

## ZUSAMMENFASSUNG

### EINFLUSS DER LÖSLICHEN ORGANISCHEN VERBINDUNGEN AUF DIE BODENBILDUNG IN SAUEREM MILIEU

### II. — LABORATORIUMSVERSUCHE WIRKUNGSARTEN DER KOMPLEXIERENDEN MITTEL

Die im Laboratorium durchgeführten Versuche zeigten die folgenden Bodenbildungsmechanismen auf :

— *In den Böden mit Auflagehumus :*

Die organischen Säuren verharren in den Streuschichten, filtrieren durch die A – Horizonte und gelangen in die B – Horizonte der Podzols. Aber die aliphatischen Säuren allein spielen eine wichtige Rolle in der Komplexierung und der Bildung der Fe – und Al – Kationen. Ausserdem begünstigen dieselben Säuren die Wanderung der aus den Streuschichten stammenden Polymere. In den spodischen Horizonten werden zunächst alle untersuchten Saüren die aromatischen als auch die aliphatischen, durch einen im wesentlichen *chemischen* Prozess unlöslich gemacht. Anschliessend werden sie teilweise mineralisiert und besonders in mehr oder weniger polymerisierte, humushaltige Verbindungen eingebracht.

— *In den Böden mit Mull :*

Eine starke biologische Aktivität unter ständige Anwesenheit von austauschbaren Kationen ruft eine Unlöslichamchung und eine an Ort und Stelle getätigte Umwandlung (in der Streuschicht und in dem Mull) der Säuren hervor bei gleichzeitiger biochemischer Eingliederung in die stark polymerisierten, feuchten Verbindungen. Jede Wanderung der Komplexe ist ausgeschlossen.

## РЕЗЮМЕ

*Влияние растворимых органических соединений на почвообразование в кислой среде*.*

### II. ЛАБОРАТОРНЫЕ ОПЫТЫ. СПОСОБЫ ДЕЙСТВИЯ КОМПЛЕКСИРУЮЩИХ АГЕНТОВ.

С. БРЮККЕР.

Результаты лабораторных опытов указывают на существование следующих механизмов почвообразования :

*В грубогумусовых почвах* — органические кислоты продолжают существовать в подстилках, просачиваются через горизонты А, и попадают в горизонты Б подзолов, но в комплексации и увлечении катионов Fe и Al играют важную роль только кислоты алифатические; они-же содействуют, кроме того, миграции полимеров подстилочного происхождения. В сподик-горизонтах все изучавшиеся кислоты, как ароматические, так и алифатические, превращаются в нерастворимые формы с помощью процессов главным образом *химических*, и затем, частично минерализуются, чтобы по большей части включиться в состав более или менее полимеризованных гуминовых соединений.

*В почвах с мулем* — сильная биологическая активность сопряженная с постоянным присутствием обменных катионов, вызывает образование нерастворимых форм и превращение кислот на месте (в подстилке и муле), с последующим их биохимическим вовлечением в состав сильно полимеризованных гуминовых соединений; какая-бы то ни было миграция комплексов, подавляется.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


ADACHI M., 1964. The eluviation and accumulation of sesquioxydes by fulvic acid. 2. The behaviour of fulvic acid and sesquioxides in model profile. *J. Soil Sci.*, Tokyo, **35**, 139-142.

ANDREUX F., 1969. *Contribution à l'étude des processus de mélanification des autolysats végétaux* (Juglans regia). Thèse, Nancy.

BECK G., BRUCKERT S., DOMMERGUES Y., 1969. *Un milieu de culture pour les micro-organismes dégradant l'acide vanillique.* Note tech. Centre de Pédologie, Nancy, **1**, 1-2.

BELOUSOVA N. I., TONKONOGOV V. D., 1968. Weathering of Kamchatkan volcanic ash. *Pochvovedenie*, **5**, 43-55.

BINGHAM F. T., SIMS J. R., PAGE A., 1965. Retention of acetate by montmorillonite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **29**, 670-672.

BLOOMFIELD C., 1952. Translocation of iron in podzol formation. *Nature*, Lond., **170**, 540.

BLOOMFIELD C., 1957. The possible significance of polyphenols in soil formation. *J. Sci. Food Agric.*, **8**, 389-392.

BLOOMFIELD C., 1963. Mobilization phenomena in soils. *Rep. Rothamst. exp. Sta.*, 226-239.

BLOOMFIELD C., KING H. G. C., 1968. Mechanism of podzolization. Isolation of polyphenols from aqueous extracts of fallen oak leaves. *Rep. Rothamsted exp. Sta.*, 75-77.

BLUME H. P., 1964. Zum Mechanismus der Tonverlagerung. *8th Intern. Congr. Soil Science*, Bucarest, **5**, 715-722.

BREMNER J. M., HEINTZE S. G., MANN P. G. T., LEES H., 1946. Metallo-organic complexes in soil. *Nature*, Lond., **158**, 790-791.

BRUCKERT S., 1966. Répartition des acides hydrosolubles dans quelques profils de sols forestiers. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **263**, 1572-1575.

BRUCKERT S., DOMMERGUES Y., 1966. Étude expérimentale de la biodégradation de deux complexes organo-ferriques dans un sol à mor et dans un sol à mull. *Sci. Sol.*, **2**, 65-76.

BRUCKERT S., JACQUIN F., 1966. Relation entre l'évolution des acides hydrosolubles de deux litières forestières et les processus pédogénétiques. *Bull. E. N. S. A. N.*, **8**, 95-112.

BRUCKERT S., JACQUIN F., METCHE M., 1967. Contribution à l'étude des acides phénols présents dans les sols. *Bull. E. N. S. A. N.*, **9**, 73-92.

BRUCKERT S., DOMMERGUES Y., 1968. Importance relative de l'immobilisation physico-chimique et de l'immobilisation biologique du fer dans les sols. *Sci. Sol*, **1**, 19-27.

BRUCKERT S., JACQUIN. F., 1969 *a*. Interaction entre la mobilité de plusieurs acides organiques et de divers cations dans un sol à mull et dans un sol à mor. *Soil Biol. Biochem.*, **1**, 275-294.

BRUCKERT S., JACQUIN F., 1969 *b*. Complexation du fer (III) par les fractions organiques d'un extrait naturel de mor. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **269**, 1625-1628.

BRUCKERT S., 1970. Méthodes d'analyse des acides organiques et des composés phénoliques présents dans les sols. *Note tech. Centre de Pédologie*, Nancy, **9**, 1-13.

BUCKMAN H. O., BRADY N. C., 1960. *The nature and Properties of Soils.* Macmillan, New York.

COULSON C. B., DAVIES R. I., LEWIS D. A., 1960 *a*. Polyphénols in plant, humus and soil. I. Polyphenols of leaves, litter and superficial humus from mull and mor sites. *J. Soil Sci.*, **11**, 20-29.

COULSON C. B., DAVIES R. I., LEWIS D. A., 1960 *b*. Polyphenols in plant, humus and soil. II. Reduction and transport by polyphenols of iron model soil columns. *J. Soil Sci.*, **11**, 30-44.

COURPRON C., 1967. Détermination des constantes de stabilité des complexes organo-métalliques des sols, *Ann. agron.*, **18**, 623-638.

CRAWFORD D. V., 1956. Microbiological aspects of podzolisation. *6e Congr. Intern. Sci. Sol, Paris.* **3**, 197-201.

DEB B. C., 1950. The estimation of free iron oxides in soils and clay and their removal. *J. Soil Sci.*, **1**, 212-220.

DEHAY H., CARRÉ M., 1957. Étude de la composition de quelques excrétions radicellaires. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **244**, 230-233.

DEMOLON A., 1952. *Dynamique du sol.* Dunod, Paris.

DOMMERGUES Y., DUCHAUFOUR Ph., 1965. Étude comparative de la dégradation biologique des complexes organo-ferriques dans quelques types de sols. *Sci. du Sol*, **1**, 43-59.

DOMMERGUES Y., BECK G., 1966. Mise en évidence des micro-organismes dégradant les complexes organo-métalliques dans le sol. *Biol. Sol*, **6**, 32-34.

DUCHAUFOUR Ph., 1948. Recherches écologiques sur la chênaie atlantique française. *Ann. E. N. R. F.*, **11**, 1-335.

DUCHAUFOUR Ph., SOUCHIER B., 1966. Note sur une méthode d'extraction combinée de l'aluminium et du fer libres dans les sols. *Sci. Sol*, **1**, 17-29.

DUCHAUFOUR Ph., VEDY J. C., BRUCKERT S., 1968. Contribution à l'étude *in situ* de l'évolution chimique et de l'altération d'un grès et d'un granite vosgiens sous l'influence de deux types de litières. *Bull. A. F. E. S.*, **1**, 5-18.

DUDAL R., 1953. Étude morphologique et génétique d'une séquence de sols sur limon lœssique. *Agricultura*, Bruxelles, **1**, 119-163.

EHWALD E., KUNDLER P., SCH-DCHIN Sjang., 1964. Anfangsstadien der Podzolierung und Lessivierung in Mitteleuropäischen Waldböden. *Academy of Agric.-Sciences*, Sofia, 182-187.

FLAIG W., 1965. Effect of Lignin Degradation Products on Plant Growth. Isotopes and radiation in *Soil Plant Nutrition Studies, I. A. E. A.*, Vienne, 3-19.

FRIDLAND V. M., 1958. To the problems of podzolization and illimerization. *Pochvovedenie*, **1**, 27-38.

GALLAGHER P. H., WALSH T., 1943. The solubility of soil constituents in oxalic acid as an index of the effects of weathering. *Proc. R. Ir. Acad.*, **49**, 1-26.

GUCKERT A., ROGER P., JACQUIN F., 1968. Contribution à l'utilisation des méthodes radioisotopiques pour l'étude de la matière organique du sol. *Bull. E. N. S. A. N.*, **10**, 69-100.

GULYAS F., 1967. The role of some soil fungi in the microbiological decomposition of lignin. *Agrokém. Talajt.*, **16**, 137-150.

HARRAR N. J., 1929. Solvent effects of certain organic acids upon oxides of iron. *Econ. Geol.*, **24**, 50-61

HÉNIN S., BÉTRÉMIEUX R., 1950. Étude expérimentale de l'évolution des matières organiques dans le sol. *C. R. Acad. Sci.*, **231**, 550-552.

JACQUIN F., 1963. Contribution à l'étude des processus de formation et d'évolution de divers composés humiques. *Bull. E. N. S. A. N.*, **5**, 1-156.

JACQUIN F., BRUCKERT S., 1965. Identification et évolution des acides hydrosolubles de deux litières forestières. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **260**, 4556-4559.

JACQUIN F., MANGENOT F., 1964. Formation de composés de type humique à partir d'extraits aqueux de *Melandryum silvestre* (*Schkuhr*) ROEHL. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **258**, 4607-4610.

JOB P., 1928. *Ann. Chim.*, **9**, 113.

JONES H. T., WILLCOX J. S., 1929. Studies in soil genetics. *J. Soc. Chem. Ind.*, **48**, 304-308.

JUNG G., BRUCKERT S., DOMMERGUES Y., 1968. Étude comparée de diverses substances hydrosolubles extraites de quelques litières tropicales et tempérées. *Œcol. Plant.*, **3**, 237-253.

KAURICHEV I. S., NOZDRUNOVA E. M., 1960. Study of the migration of some compounds in soils by means of lysimetric chromatographic columns. *Pochvovedenia*, **12**, 30-35.

KAURICHEV I. S., SHISHOVA V. S., 1966. The composition of surface lysimetric waters of sandy soils of the southern-taïga sub-zone. Dekl. mosk. sel'-khoz. *Akad. K. A. Timiryazova*, **115**, 111-118.

KENDRICK W. B., 1958. *Microfungi on pine litter.* Ph. D. Thesis University of Liverpool.

KENDRICK W. B., BURGES A., 1962. Biological aspect of the decay of *Pinus silvestris* leaf litter. *Nova Hedwigia*, **4**, 313-242.

KING H. G. C., BLOOMFIELD C., 1966. The reaction between water-soluble tree leaf constituents and ferric oxide in relation to podzolization. *J. Sci. Fd. Agric.*, **17**, 39-43.

KING H. G. C., BLOOMFIELD C., 1968. The effects of drying and ageing tree leaves on the ability of their aqueous extracts to dissolve ferric oxide. *J. Soil Sci.*, **19**, 67-76.

KOHL F., 1958. Durchwaschungs- und Durchschlämmungserscheinungen an Böden aus Bayern. *Z. PflErnähr. Düng. Bodenk*, **80** (3), 237-244.

KUNDLER P., 1957. Zur Charakterisierung un Systematik der Braunen Waldböden. *Z. PflErnhär. Düng. Bodenk.*, **78** (2/3), 209-232.

KYUMA K., KAWAGUCHI K., 1964. Oxidative changes of polyphenols as influenced by allophane. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28**, 371-374.

LEBEDEVA I., 1967. Agricultural physical properties of the gray forest soils of the Mordvinian A. S. S. R. *Pochvovedenie*, **3**, 72-84.

LEWIS J. A., STARKEY R. L., 1969. Decomposition of plant tannins by some soils microorganisms. *Soil Sci.*, **107**, 235-242.

LOSSAINT P., 1954. Solubilisation du fer dans un sol par les extraits aqueux de litière de charme et de pin silvestre. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **239**, 187-189.

LOSSAINT P., 1957. Sur le pouvoir réducteur des extraits de quelques litières forestières. Litières non décomposées. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **245**, 2091-2093.

LOSSAINT P., 1959. Étude expérimentale de la mobilisation du fer des sols sous l'influence des litières forestières. *Ann. agron.*, **4**, 369-414 et **5**, 493-542.

MACFEE W. W., STONE E. L., 1965. Quantity distribution and variability of organic matter and nutrients in a forest podzol in New York. *Soil Sc. Soc. Amer. Proc.*, **28**, 43-59.

MACKEAGUE J. A., ARNAUD R. J., 1969. Pedotranslocation : eluviation-illuviation in soils during the Quaternary. *Soil Sci.*, **107**, 428-435.

MANGENOT F., JACQUIN F., METCHE M., 1965. A propos des interactions Plante-sol. I. Les exsudats foliaires peuvent-ils être une source de substances humiques? *Œcol. Plant.*, **1**, 79-102.

MARTIN A. E., REEVE R., 1960. Chemical studies of podzolic illuvial horizons. IV. The floculation of humus by aluminium. *J. Soil Sci.*, **11**, 369-381.

MOLLIARD M., 1922. Sur une nouvelle fermentation acide produite par le *Sterigmatocystis nigra*. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **174**, 881-883.

MORGAN J. V., TUKEY H. B. Jr, 1964. Characterization of leachate from plant foliage. *Plant Physiology*, **39**, 590-593.

MORTENSEN J. L., 1963. Complexing of metals by soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **27**, 179-186.

MUIR J. W., MORRISSON R. I., BOWN C. J., LOGAN J., 1964 *a*. The mobilization of iron by aqueous extracts of plants : I. Composition of the amino-acid and organic-acid fractions of an aqueous extract of pine needles. *J. Soil Sci.*, **15**, 220-225.

MUIR J. W., MORRISSON R. I., BOWN C. J., LOGAN J., 1964 *b*. The mobilization of iron by aqueous extracts of plants : II. Capacities of the amino-acid and organic acid fractions of a pine needle extract to maintain iron in solution. *J. Soil Sci.*, **15**, 225-237.

NYKVIST N., 1963. Leaching and decomposition of water-soluble organic substances from different types of leaf and needle litter. *Studia Forestalia Suecica*, **3**, 1-31.

REMEZOV N. P., 1961. Decomposition of forest litter and the cycle of element in an oak forest. *Pochvovedenie*, **7**, 1-12.

RINGBOM A., 1967. *Les complexes en chimie analytique*. Dunod, Paris.

RODE A. A., 1964. Podzolization and lessivage. *Pochvovedenie*, **7**, 9-23.

RODE A. A., RASHEVSKAYA I. M., 1966. Genetic profile characteristics of a podzolized brown soil of pseudogley type. *Stiinta Sol.*, **4**, 29-41.

RODIONOV V. S., VYSOTSKAYA P. N., 1967. Content and qualitative composition of humus in eroded gray forest soils. *Pochvovedenie*, **2**, 74-82.

ROGER P., BRUCKERT S., JACQUIN F., 1969. Évolution de l'acide citrique dans un sol brun lessivé et dans un podzol humo-ferrugineux. *Sci. Sol*, **2**, 99-113.

SCHNITZER M., DELONG W. A., 1952. A Note on the podzolization process. *Sci. Agric.*, **32**, 680-681.

SCHNITZER M., SKINNER S. I. M., 1963. Organo-metallic interactions in soils : 1° Reaction between a number of metal ions and the organic mater of a podzol $B_h$ horizon. *Soil Sci.*, **96**, 86-93.

SCHNITZER M., SKINNER S. I. M., 1964. Organo-metallic interactions in soils : 3e Properties of iron and aluminium organic matter complexes prepared in the laboratory and extracted from a soil. *Soil Sci.*, **98**, 197-203.

SCHNITZER M., 1967. Humic acid chemistry : Chemical structure of a podzol fulvic acid. *Soil Research Institute*, Ottawa, research report, 73-74.

SCHNITZER M., 1969. Reactions between fulvic acid, a soil humic compound and inorganic soil constituents. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **33**, 75-81.

SCHNITZER M., DESJARDINS J. G., 1969. Chemische Eigenschaften eines natürlichen Boden-Sickerwassers aus einem Humuspodzol. *Canad. J. Soil Sci.*, **49**, 151-158.

SIUTA J., 1962. Influence of reduction processes and acidification on the solubility of mineral soil compounds. *Pochvovedenie*, **5**, 62-72.

SMYTHE C. V., SCHMIDT C. L. A., 1930. Studies on the mode of combination of iron with certain proteins amino acids and related compounds. *J. Biol. Chem.*, **88**, 241-269.

SUNDMAN V., 1964. The ability of α-conidendrin-decomposing *Agrobacterium* strains to utilize other lignous and lignin related compounds. *G. Gen. Microbiol.*, **36**, 185-201.

TAMM O., 1922. Eine Methode zur Bestimmung der anorgischen Komponenten der Gelkomplexes in *Boden.-Medd. for Statens Skogsförsökans Falt*, **19**, 385-404.

TEN KH. M., 1967. Microorganisms oxidizing iron and manganese in soils of south Sakhalin. *Mikrobiologiya*, **36**, 337-344.

TOUTAIN F., DUCHAUFOUR Ph., 1970. Étude comparée des bilans biologiques de certains sols de hêtraie. *Ann. Sci. Forest.* (sous presse).

VANCURA V., HOVADIK A., 1965. Root exudats of plants : II. Composition of root exudats of some vegetables. *Plant and Soil*, **22**, 21-32.

VAN DER DRIFT J., 1963. The disappearance of litter in mull and mor in connection with weather conditions and the activity of the macrofauna. *Soil organisms*, 125-133. N. H. C. Amsterdam.

VOSBURGH W. C., COOPER G. R., 1941. Complex ions : the identification of complex ions in solutions by spectrophotometric measurements. *J. amer. Chem. Soc.*, **63**, 437-442.

WEHMER, 1893. Cité par Aubel E. : *Les fermentations*. Presses universitaires de France, 1960.

WITTICH W., 1963. Bedeutung einer leistungefähigen Regenwurmfaune unter Nadelwald für Streuzersetzung. Humusbildung und allgemeine Bodendynamik und Grundlagen der forstlichen Standortskertierung und Gründzüge ihrer Durchführung. *Schirftenraihe der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen*, **30**.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (6), 759-775.

# ESSAI DE CLASSEMENT DES TERRAINS EN AUNIS POUR LEUR UTILISATION AGRICOLE

B. COCHARD et J.-P. DEFFONTAINES

*Station d'Agronomie et d'Œnologie, 67 boulevard Deltour, 31 - Toulouse*

*Service d'Expérimentation et d'Information,*
*Centre national de la Recherche agronomique, 78 - Versailles*

*Institut national de la Recherche agronomique*

## RÉSUMÉ

A l'occasion d'une étude de potentialités agricole en Aunis, petite région naturelle du département de Charente-Maritime, certains sols argilo-calcaires, cultivés en céréales, tournesol et luzerne, ont été classés à l'aide d'un critère structural simple : la dimension des éléments structuraux. Ce classement concorde à la fois avec celui de propriétés agronomiques des terrains correspondants (facilité de travail, rendement, système de culture...) déterminés par enquête et celui de divers caractères pédologiques (texture, profondeur des horizons...) décelés par examen de profils. On montre ainsi que le concept de structure du sol est un lien important entre l'agronomie et la pédologie.

## INTRODUCTION

A l'occasion de l'étude technique et économique des systèmes de production en Aunis réalisée de juillet 1967 à décembre 1969 par une équipe de chercheurs de disciplines diverses de l'I. N. R. A. et de l'I. N. A. (I. N. R. A.-I. N. A.-A.D.A.C., 1969), nous avons été amenés à caractériser les terrains de cette région, plus particulièrement des cantons de Surgères, Aigrefeuille et La Jarrie. Cette caractérisation a été réalisée en suivant une démarche particulière qui fait l'objet de cette note.

L'étude des cartes topographiques, géologiques et des travaux réalisés dans la région (VERDIER *et al.*, 1934), confirmée par une prospection sommaire sur le terrain, montre qu'en première approximation, il existe des relations entre la nature géologique, le relief, l'occupation des terrains et les dénominations vernaculaires (tabl. 1).

Cette constatation a suggéré une étude plus détaillée des propriétés des deux terrains les plus représentés, les « groies » et « argilo-calcaires », situés sur Séquanien et Kimméridgien inférieur.

TABLEAU I

*Caractéristiques des différents terrains*

| Étages | Faciès | Relief | Occupation du sol | Noms vernaculaires des sols et superficies (1) |
|---|---|---|---|---|
| $a_{2b}$ : Alluvions modernes marines | Argileux (argiles sodiques) | Plat (bassin) | Marais, prairies extensives | « Terres de Brie » 5 400 ha (12,2 %) |
| $a_{2b_1}$ : Alluvions modernes tourbeuses | Alluvions ± tourbeuses | Fonds de vallées | — Prairies permanentes<br>— Cultures récentes intensives (maïs, p. de t.)<br>— Jardinage<br>— Arbres | « Terres de Motte » 3 500 ha (8,1 %) |
| $a_{1b}$ : Limons des plateaux | Limoneux | Plateaux | Cultures | « Varennes » 540 ha (1,2 %) |
| $J_{5a}$ : Kimméridgien inférieur | Calcaires marneux et marnes bleues | Rebords sud de plateau | — Cultures<br>— Prairies permanentes<br>— Bois<br>— Vignes | « Groies » et « argilo-calcaires » à tendance limoneuse 6 180 ha (14,1 %) |
| $J_{4c}$ : Séquanien supérieur | Calcaires compacts et marnes, récifs coraliens | Plateaux | — Cultures<br>— Bois<br>— Vignes | « Groies » et « argilo-calcaires » 12 480 ha (28,4 %) |
| $J_{4b}$ : Séquanien moyen | Calcaires compacts et marneux | Plateaux | — Cultures<br>— Bois<br>— Vignes | 12 000 ha (27,5 %) |
| $J_{4a}$ : Séquanien inférieur | Calcaires marneux tendres | Plateaux | — Cultures<br>— Bois<br>— Vignes | 3 320 ha (7,6 %) |

(1) Les superficies sont mesurées entre les parallèles 120 et 135 et les méridiens 336 et 364 (Fig.1 )

## I. — MÉTHODE D'OBSERVATION

Les observations sont réalisées sur des stations choisies dans des parcelles cultivées en luzerne (année d'implantation), céréales et tournesol. Le choix des stations a été guidé par l'aspect moyen de la végétation. Étant donné le but poursuivi dans l'étude globale, ces parcelles font partie

d'exploitations retenues pour les hauts niveaux de production qui y sont habituellement obtenus. Elles sont au nombre de 4 ou 5 par commune de façon à assurer leur répartition homogène dans la région étudiée.

TABLEAU 2

*Répartition des stations selon les cultures et l'étage géologique*

| Étages géologiques | Luzerne 1re année | Orge | Blé | Tournesol | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| $J_{5a}$ | 11 | 2 | 10 | 1 | 24 |
| $J_{4c}$ | 22 | 35 | 39 | 2 | 98 |
| $J_{4b}$ | 7 | 9 | 22 | 7 | 45 |
| Total | 40 | 46 | 71 | 10 | 167 |

Les informations recueillies sur ces stations résultent :

— de l'examen de profils culturaux, de 60 cm de profondeur environ (HÉNIN *et al.*, 1969) ;

— de prélèvements d'échantillons de la terre arable, en gardant le plus possible les éléments structuraux ;

— de l'enregistrement des rendements ;

— d'interviews auprès des agriculteurs portant sur :
  — les dénominations vernaculaires,
  — les problèmes de ressuyage,
  — les difficultés de travail du sol,
  — les systèmes de production :

— de l'étude des documents cartographiques (carte topographique au 1/25 000 et carte géologique au 1/80 000).

## II. — CLASSEMENT DES TERRES SELON LA STRUCTURE

C'est au cours d'un essai infructueux de classification des terres à partir de la texture, jugée au toucher, qu'est apparue une nette différenciation des échantillons selon la taille des éléments structuraux. Les terres provenant des stations ayant fait l'objet d'un prélèvement en juillet, alors que le sol était sec (1), ont été classés selon ce critère de structure (tabl. 3).

Cette appréciation visuelle a été complétée par des mesures. Le tamisage des échantillons de terre, réalisé après séchage en laboratoire, fut davantage un calibrage, dans la mesure où pour ne pas rompre les éléments structuraux, ils étaient présentés en face des trous des tamis. Nous avons déterminé les rapports :

$$\frac{\text{Poids des éléments structuraux supérieurs à 4 cm}}{\text{Poids total de l'échantillon}}$$

$$\frac{\text{Poids des éléments structuraux entre 2 et 4 cm}}{\text{Poids total de l'échantillon}}$$

(1) Cette condition était impérative sachant que la cohésion des éléments structuraux varie en fonction de l'humidité. Les mois de juin et juillet 1968 furent très secs si bien que les sols étaient desséchés. Le dernier travail du sol avait été réalisé en novembre pour le blé et en avril pour les cultures de printemps. Il n'a pas été observé de différences de structure selon les cultures.

TABLEAU 3

*Classement des terres selon la dimension des agrégats* (1)

| Classes de structure | Critères de classification | Nombre d'échantillons |
|---|---|---|
| 1 : Structure à éléments très fins | Très petits éléments structuraux<br>Dimension la plus fréquente<br>< 1 cm | 39 |
| 2 : Structure à éléments fins | Petits éléments structuraux<br>Dimension la plus fréquente<br>= 1 cm | 10 |
| 3 : Structure à éléments moyens | Éléments structuraux moyens<br>Dimension la plus fréquente<br>de 1 à 2 cm | 9 |
| 4 : Structure à éléments grossiers | Gros éléments structuraux<br>Dimension la plus fréquente<br>= 2 cm | 16 |

Le classement structure correspond bien à des différences dans la répartition des éléments structuraux selon leur taille (tabl. 4).

TABLEAU 4

*Structure et pourcentage d'éléments structuraux de dimension supérieure à deux centimètres*

| Répartition éléments structuraux | Classes structure | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 (Très fins) | 2 (Fins) | 3 (Moyens) | 4 (Grossiers) |
| Nombre d'échantillons .. | 27 | 6 | 6 | 13 |
| % d'agrégats > 4 cm .. | 1,6 | 7,2 | 12,9 | 28,7 |
| % d'agrégats entre 2 et 4 cm ..... | 5,4 | 17,0 | 14,8 | 11,7 |

Il convient de s'interroger sur la valeur de ce classement, commode à établir. C'est la raison pour laquelle la structure est mise en relation avec diverses données relatives à la terre arable, au profil du sol, à la production agricole et au paysage.

## III. — RELATIONS ENTRE STRUCTURE ET CARACTÉRISTIQUES DE LA TERRE ET DU PROFIL

### 1. — *Cohésion des éléments structuraux*

Une appréciation de la cohésion a été effectuée sur le profil en tenant compte de la résistance des éléments structuraux à la pression des doigts.

(1) Ce classement est relatif aux échantillons des stations étudiées en 1968 pour lesquelles on dispose du plus grand nombre d'informations. Celles-ci sont incomplètes pour certaines stations c'est la raison pour laquelle, par la suite, l'effectif varie légèrement selon le facteur étudié.

Le tableau suivant indique une relation significative ($\chi^2 = 9{,}72$, $n = 3$, $P = 0{,}05$) avec la structure ; les faibles cohésions sont plus fréquentes dans les structures fines. On ne peut cependant exclure que cette relation soit, en partie du moins, due à la méthode d'appréciation de la cohésion.

TABLEAU 5

*Structure et cohésion des agrégats*

| Cohésions | Classes structure | | | | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| Cohésion faible ..... | 27 | 5 | 2 | 5 | 39 |
| Cohésion forte ..... | 12 | 5 | 7 | 11 | 35 |
| Total ..... | 39 | 10 | 9 | 16 | 74 |

## 2. — *Teneur en cailloux*

Les cailloux ont été isolés par tamisage après destruction des agrégats ; la teneur est exprimée en poids de cailloux sur le poids total de l'échantillon.

Le tableau 6 montre l'existence d'une relation inverse entre le taux de cailloux, principalement de dimensions inférieures à 2 cm, et la structure.

TABLEAU 6

*Structure et taux de cailloux*

| Classes structure | Nombre d'échantillons | Taux total de cailloux | Taux de cailloux de diverses dimensions | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 0,2 à 1 cm | 1 à 2 cm | 2 à 4 cm | > 4 cm |
| 1 | 36 | 33,8 | 12,5 | 11,2 | 8,0 | 2,1 |
| 2 | 7 | 25,2 | 7,7 | 8,4 | 8,3 | 0,8 |
| 3 | 9 | 20,6 | 5,8 | 6,0 | 6,4 | 2,4 |
| 4 | 14 | 16,8 | 4,5 | 5,4 | 5,2 | 1,7 |

Cette relation est vérifiée par le calcul des corrélations suivantes :
taux total de cailloux — taux agrégats $\geqslant 2$ cm : $r = -0{,}79$ sign. à $P = 0{,}05$
taux cailloux de 0,2 à 2 cm — taux agrégats $\geqslant 2$ cm : $r = -0{,}78$ sign. à $P = 0{,}05$

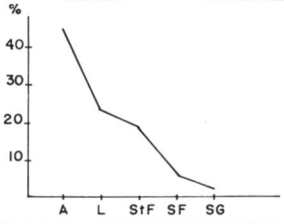
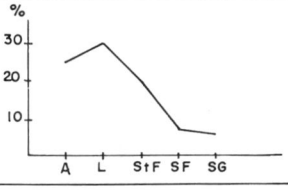
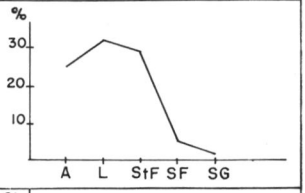
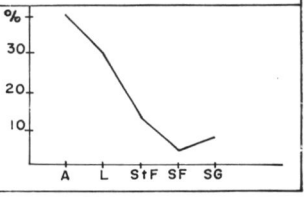
## 3. — *Texture de la terre fine*

Les résultats des analyses granulométriques de 22 échantillons dont, 10 en structure grossière et 12 en structure très fine, sont consignés dans le tableau 7 (1).

(1) Pour limiter le nombre des analyses, des échantillons appartenant aux deux classes extrêmes de structure ont été pris au hasard, avec un effectif voisin dans les deux cas.

TABLEAU 7

*Structure et texture*

| Taux de cailloux > 0,2 cm | Classes structure | Effectif | Teneur en $CO_3Ca$ | Granulométrie de la terre fine Courbes types |
|---|---|---|---|---|
| < 18 % | 4 | 6 | faible (traces à 18%) |  |
| > 30% | 1 | 9 | élevée (21 à 31%) |  |
| 18 à 30 % | 4 | 4 | faible (traces à 16%) |  |
| 18 à 30 % | 1 | 3 | élevée (15 à 34 %) |  |



Ce tableau montre l'interaction entre la teneur en cailloux, la texture de la terre fine, le taux de calcaire et la structure.

En effet, pour des teneurs moyennes de cailloux comprises entre 18 et 30 p. 100, à différentes grosseurs d'éléments structuraux correspondent des textures et des taux de $CO_3Ca$ différents, une terre argileuse très calcaire donnant de plus petits éléments, c'est-à-dire se fissurant davantage qu'une autre.

Par contre, les sols à faible taux de cailloux (< 18 p. 100) présentant tous des structures grossières, correspondent à des textures argileuses ; ceux à plus de 30 p. 100 de cailloux dont les structures sont toujours fines ont une texture plus limoneuse.

On observe de faibles taux de $CO_3Ca$ dans des sols à structures grossières.

Le calcul des formules d'effritement et de fendillement (HÉNIN et BOSQUET, 1964) à partir des résultats de granulométrie permet de penser que les sols devraient se fissurer abondamment. Or, les agriculteurs mentionnent peu l'existence de fentes de retrait et nous avons rarement observé des fissures dans les profils en été, sauf dans les terres peu caillouteuses.

Ces faits ne sont pas contradictoires si l'on admet que les tests considérés se rapportent uniquement à la terre fine et que, dans les profils, nous avons observé un ensemble (cailloux + terre fine) qui, probablement, se fissure beaucoup en période sèche, mais pas de la même manière qu'un sol non caillouteux. Les observations détaillées donnent l'impression que cette fissuration se fait à partir des contours des cailloux. On obtient alors une structure polyédrique sans orientation privilégiée des fissures à l'inverse de ce qui se passe dans les terres très argileuses sans cailloux où le réseau de fissure garde les mêmes orientations pendant toute la période de dessiccation, ce qui conduit à la formation de grosses fissures profondes.

### 4. — *Horizons inférieurs du profil*

En comparant des sols avec et sans « banche » : horizon de cailloux situé immédiatement sous l'horizon labouré, on peut distinguer :

— la « banche » plate formée de dalles calcaires dures et jointives,

— la « banche » fissurée contenant 80 p. 100 de gros cailloux de calcaire tendre, disposés sans orientation privilégiée; l'horizon sous-jacent est formé d'un ensemble compact de cailloux et de terre fine.

Dans les sols sans « banche » l'horizon sous le labour contient uniquement de la terre fine et des petits cailloux (30 à 50 p. 100), le sous-sol est constitué de marnes ou d'une alternance de marnes et de lits de calcaire dur.

TABLEAU 8

*Structure et horizons sous-jacents*

| Horizons sous-jacents | Classes structure | | | | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| Banche fissurée ..... | 29 | 5 | 4 | 3 | 41 |
| Banche plate ..... | 1 | 1 | 0 | 1 | 3 |
| Sans banche ..... | 0 | 1 | 4 | 10 | 15 |
| Total ..... | 30 | 7 | 8 | 14 | 59 |

TABLEAU 9

*Structure et profondeur des horizons compacts*

| Profondeur de l'horizon compact | Classes structure | | | | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| < 35 cm | 1 | 1 | 2 | 7 | 11 |
| ⩾ 35 cm | 29 | 6 | 6 | 7 | 48 |
| Total | 30 | 7 | 8 | 14 | 59 |

Dans le tableau 8 apparaît une relation entre la nature de l'horizon situé sous l'horizon cultivé et la structure de ce dernier.

La profondeur où apparaissent les horizons compacts, c'est-à-dire les « banches plates » ou les horizons sous-jacents des sols sans « banche » ou à « banche fissurée » est en relation avec le classement structure, comme l'indique le tableau 9 ($\chi^2 = 15{,}72$, $n = 3$, $P < 0{,}01$). La structure est grossière quand la profondeur est faible.

## IV. — RELATIONS ENTRE STRUCTURE ET PRODUCTION AGRICOLE

Il convient d'abord de remarquer (tabl. 10) que le classement établi en fonction des caractéristiques de structure est en relation avec les dénominations vernaculaires qui sont généralement l'expression traditionnelle des comportements agricoles des terrains ($\chi^2 = 26{,}66$, $n = 3$, $P = 0{,}01$).

TABLEAU 10

*Structure et noms vernaculaires*

| Noms vernaculaires | Classes structure | | | | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| Groies | 25 | 4 | 0 | 2 | 31 |
| Argilo-calcaires | 1 | 1 | 3 | 7 | 12 |
| Total | 26 | 5 | 3 | 9 | 43 |

Le classement structure a été mis en comparaison avec des caractéristiques agronomiques des sols appréciées par les exploitants eux-mêmes, telles que : difficulté de circulation de l'eau, facilité de travail du sol, ou avec des données comme l'enracinement des plantes cultivées, les rendements et le système de production.

### 1. — *Circulation de l'eau et travail du sol*

Du tableau 11, il ressort que les sols considérés :

— sont faciles à travailler même en période d'excès d'eau dans 73 p. 100 des cas ; les difficultés sont significativement plus fréquentes avec les sols à structure grossière ($\chi^2 = 25{,}40$, $n = 1$, $P = 0{,}01$) ;

— ont une vitesse de ressuyage rapide dans 65 p. 100 des cas ; les infiltrations lentes sont significativement plus fréquentes dans les sols à structure grossière ($\chi^2 = 5{,}18$, $n = 1$, $P = 0{,}05$) ;

— ne présentent pas de fentes de retrait, sauf dans les sols à structure grossière ;

— sont faciles à travailler en périodes de sécheresse dans 79 p. 100 des cas, mais significativement plus souvent difficiles dans les classes à structures plus grossières ($\chi^2 = 14{,}54$, $n = 1$, $P = 0{,}01$).

TABLEAU II

*Structure, circulation de l'eau et facilité de travail du sol*

(Étant donné le faible effectif de certaines classes de structures, nous avons regroupé les classes 2, 3 et 4)

| Caractères observés sur le terrain par les enquêteurs ou les exploitants | Modalités | Classes structure | | Total |
|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 + 3 + 4 | |
| Difficultés de travail par excès d'eau | Pas de difficultés | 31 | 10 | 41 |
| | Difficile | 0 | 15 | 15 |
| | Total | 31 | 25 | 56 |
| Vitesse de ressuyage | Rapide | 25 | 11 | 36 |
| | Lente | 7 | 12 | 19 |
| | Total | 32 | 23 | 55 |
| Fentes de retrait dans le sol | Pas de fente | 10 | 2 | 12 |
| | Fentes | 0 | 3 | 3 |
| | Total | 10 | 5 | 15 |
| Difficultés de travail par excès de dessiccation | Pas de difficultés | 32 | 14 | 46 |
| | Difficile | 1 | 11 | 12 |
| | Total | 33 | 25 | 58 |

## 2. — *Rendements et enracinement*

Aucune différence de rendement n'est mise en évidence pour les céréales selon le classement structure. Par contre les rendements de la culture de tournesol apparaissent inférieurs dans les sols à structure grossière (différence significative à P = 0,05), (tabl. 12).

TABLEAU 12

*Structure et rendement en tournesol*

| | Classes structure | |
|---|---|---|
| | 1 | 2 + 3 + 4 |
| Nombre stations..... | 4 | 6 |
| Rendement à 0 % d'humidité q/ha ..... | 18,7 | 13,3 |

L'étude de l'enracinement des blés et orges en 1968 (tabl. 13) montre :

— qu'il n'existe pas de relation significative entre le classement structure et l'abondance de l'enracinement dans la terre arable d'une part, et la profondeur d'enracinement d'autre part ;

— que, par contre, il existe une relation entre la profondeur de la discontinuité d'enracinement et ce classement, les sols à structure grossière présentant cette discontinuité à une profondeur plus faible que les autres.

TABLEAU 13

*Structure et enracinement du blé et de l'orge*

| Caractères | Modalités | Classes structure | | Total |
|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 + 3 + 4 | |
| Enracinement dans la terre arable | Peu abondant | 8 | 11 | 19 |
| | Abondant | 22 | 17 | 39 |
| | Total | 30 | 28 | 58 |
| Profondeur maximum d'enracinement | < 45 cm | 6 | 4 | 10 |
| | de 45 à 65 cm | 12 | 12 | 24 |
| | > 65 cm | 12 | 12 | 24 |
| | Total | 30 | 28 | 58 |
| Profondeur de discontinuité d'enracinement | < 30 cm | 3 | 10 | 13 |
| | ⩾ 30 cm | 27 | 18 | 45 |
| | Total | 30 | 28 | 58 |

TABLEAU 14

*Classement structure et enracinement de la luzerne*

| | Classes structure | |
|---|---|---|
| | 1 | 2 + 3 + 4 |
| Nombre de stations..... | 13 | 14 |
| Moyenne des profondeurs atteintes par les racines de luzerne (cm) . | 22,5 (13-30) | 15,1 (9-28) |

Différence significative à P = 0,05

On a appelé discontinuité d'enracinement sur le profil, une différence dans la notation de la densité de racines (2 : abondantes, 1 : rares, 0 : inexistantes) en passant d'une couche de sol à une autre ; par exemple, il y a discontinuité entre l'abondance 2 dans une couche et 1 dans la suivante.

Des mesures ont été réalisées sur les racines de luzerne, l'année de leur implantation juste après la moisson de la plante-abri qui est une céréale, le plus fréquemment l'orge.

Les enregistrements des profondeurs atteintes par les racines ont été réalisés du 20 au 27 juillet 1968 sur 27 stations.

La différence de profondeur observée dans les sols à structures fines et grossières, quoique faible, peut intervenir de façon non négligeable pour l'alimentation en eau des jeunes luzernes au moment de la forte croissance qui suit la disparition de la plante de couverture et qui se situe à une période généralement sèche.

### 3. — *Système de production*

L'étude descriptive de certains aspects des systèmes de production des exploitations comme les assolements, les successions de culture et les calendriers des travaux, met en évidence des différences selon les terrains. L'introduction dans des modèles d'exploitation de telles références montre notamment que pour une exploitation de 100 ha sans bétail avec 2 UTH et 2 tracteurs, la marge brute peut s'accroître de 16 p. 100 lorsque la proportion de la surface de groie passe de 0 à 100 p. 100 de la S. A. U. (1).

## V. — RELATIONS ENTRE STRUCTURE ET FACTEURS GÉOGRAPHIQUES (2)

Le tableau 15 montre que la distribution des classes de structure des sols de l'étage $J_{4b}$ est significativement différente de celles des deux autres étages. Les distributions de $J_{4c}$ et $J_{5a}$ ne sont pas significativement distinctes.

$J_{4b}$ est presque exclusivement constitué de groies légères à structure fine.

Les sols de l'étage $J_{5a}$ ont des structures variables ; certains, non rencontrés dans les autres étages, sont limoneux.

$J_{4c}$ comprend des sols lourds ou à structure grossière et des sols légers ou à structure fine.

Il convient de préciser la localisation des différentes structures dans l'étage $J_{4c}$.

La structure diffère significativement selon le relief ($\chi^2 = 18{,}54$, $n = 3$, $P = 0{,}01$) ; sur les reliefs plats, on trouve principalement des sols à structure fine. Par contre, les pentes ont des sols à structures variables (tabl. 16).

Les terrains à forte pente ont davantage de sols à structure grossière et inversement pour les terrains à faible pente (tabl. 17).

(1) *Étude économique des systèmes de production en Aunis* : ATTONATY, DOMONT, GRAUCLAUDE (à paraître).

(2) L'étude des facteurs géographiques est réalisée à partir des stations retenues en 1967 et 1968 pour lesquelles un classement structure a pu être fait.

TABLEAU 15

*Structure et étages géologiques*

| Étages géologiques | Classes structure | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | Total |
| $J_{4b}$ | 24 | 2 | 1 | 1 | 28 |
| $J_{4c}$ | 34 | 13 | 15 | 22 | 84 |
| $J_{5a}$ | 4 | 4 | 4 | 4 | 16 |
| Total | 62 | 19 | 20 | 27 | 128 |

$J_{4b}$ — $J_{4c}$ : $\chi^2 = 14{,}68$ $n = 3$ P = 0,01.
$J_{4b}$ — $J_{5a}$ : $\chi^2 = 17{,}38$ $n = 3$ P = 0,01.
$J_{4c}$ — $J_{5a}$ : $\chi^2 = 1{,}36$ $n = 3$ P = 0,05.

TABLEAU 16

*Structure et relief pour l'étage $J_{4c}$*

Le relief a été apprécié sur la carte IGN au 1/25 000

| Relief | Classes structure | | | | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| Terrain plat..... | 17 | 3 | 2 | 0 | 22 |
| Terrain en pente > 1,5 % ... | 17 | 10 | 13 | 22 | 62 |
| Total ..... | 34 | 13 | 15 | 22 | 84 |

TABLEAU 17

*Structure et pente pour l'étage $J_{4c}$*

| Pente | Classes structure | | | | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| Pente > 2,5 % ..... | 3 | 6 | 8 | 16 | 33 |
| Pente de 1,5 à 2,5 % ..... | 6 | 3 | 5 | 4 | 18 |
| Pente < 1,5 % ..... | 8 | 1 | 0 | 2 | 11 |
| Total ..... | 17 | 10 | 13 | 22 | 62 |

## VI. — CARTE SCHÉMATIQUE DES TERRAINS (fig. 1)

Sur la carte sont distingués :

— Les terrains légers appelés groies typiques, fines groies ou groies légères à banche fissurée. Ils présentent une structure fine prédominante et s'étendent sur l'ensemble de l'étage $J_{4b}$, sur les terrains de $J_{4c}$ plats ou à faible pente, et sur quelques îlots de l'étage $J_{5a}$. Ces sols se travaillent par tous les temps, l'eau y circule facilement et l'enracinement des plantes reste abondant en profondeur.

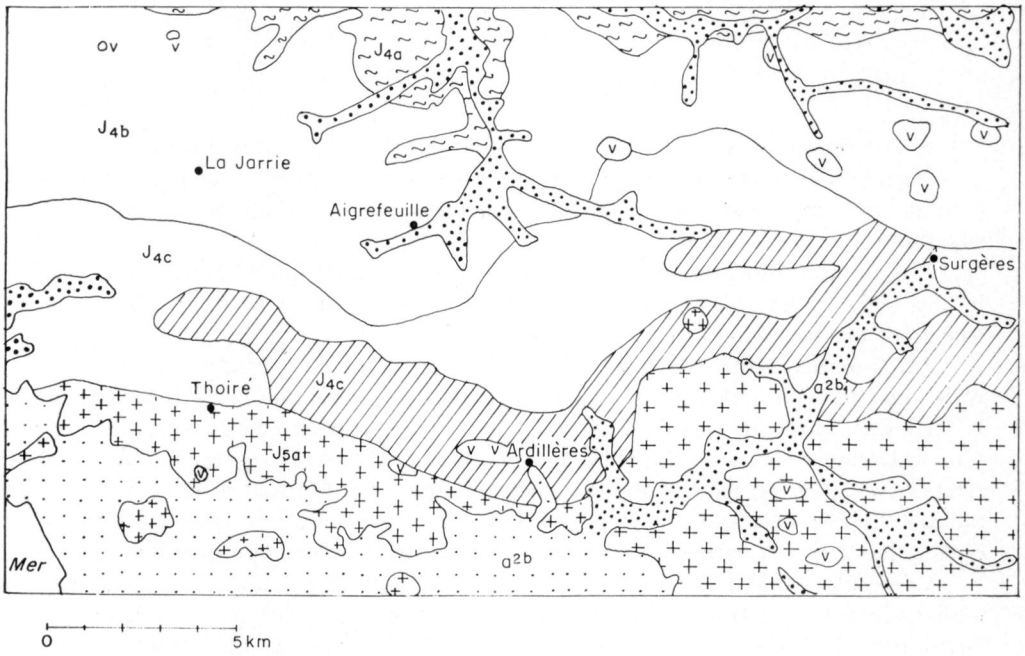



FIG. 1. — *Carte schématique des terrains*

— Les terrains lourds, « argilo-calcaires », sans banche ou à banche plate, se situent essentiellement sur les zones en pente de l'étage $J_{4c}$. Ils sont plus difficiles à travailler que les précédents en période trop humide ou trop sèche. L'eau stagne en surface en période humide lorsque le ruissellement est insuffisant. La profondeur à partir de laquelle on observe des discontinuités d'enracinement est plus faible que dans les terrains précédents.

— Les terrains argilo-calcaires à tendance limoneuse sur $J_{5a}$ sont situés dans une zone où l'hétérogénéité des terrains est plus grande. Ils se localisent sur les pentes, le haut des buttes correspondant à des groies. L'eau y circule difficilement.

## DISCUSSION ET CONCLUSION

Si l'on reprend la démarche suivie, on peut dégager différentes étapes.

Parmi les divers terrains, caractérisés par leur dénomination vernaculaire, l'étude envisage les « groies » et « argilo-calcaires » sur deux étages géologiques du Jurassique supérieur.

L'observation des terres de l'horizon travaillé montre que le facteur distinctif le plus facile à mettre en évidence est la taille des éléments structuraux. Les terres sont donc classées selon ce critère de structure.

Une première série de relations sont recherchées entre la structure et les caractéristiques plus permanentes du sol. Il apparaît une interaction entre la texture de la terre fine, la teneur en cailloux et la structure, qui met en évidence l'insuffisance d'un classement des terrains établi à partir de la seule texture de la terre fine. Ces relations révèlent également que la structure varie selon le profil pédologique. Cela montre *l'intérêt d'une carte pédologique pour l'établissement d'une carte agronomique* dans la mesure où la structure est elle-même en relation avec la production agricole.

Ce dernier point fait l'objet d'une deuxième série de relations. Elles indiquent les liens entre la structure et des caractéristiques agronomiques des terrains, comme la circulation de l'eau, la facilité de travail du sol, l'aptitude à l'enracinement des plantes cultivées, à l'obtention de forts rendements. Ceci confirme l'intérêt de ce critère de classement des terrains pour leur utilisation agricole. Les différences de structure selon les dénominations vernaculaires indiquent, dans le cas présent, l'utilité des ces appellations pour différencier globalement les terrains.

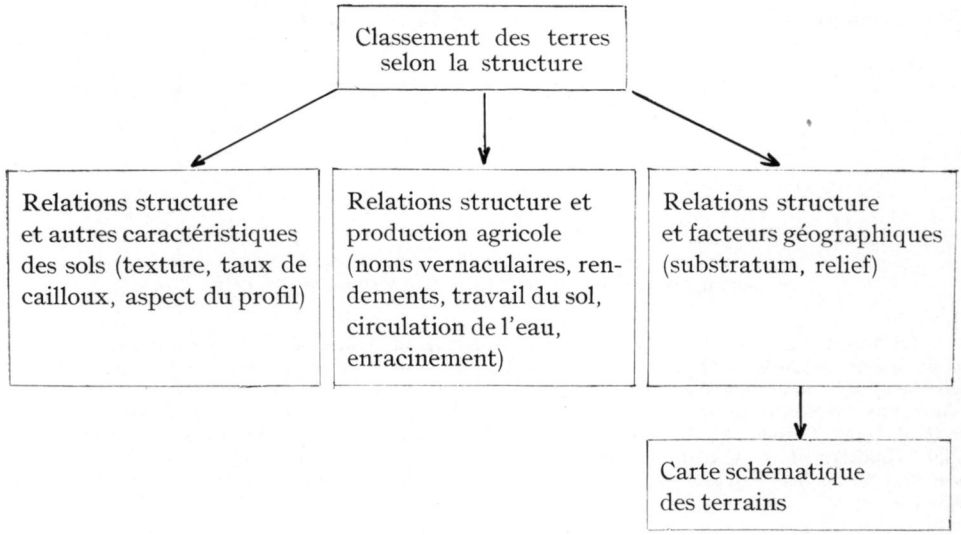
La troisième série de relations, entre les caractéristiques géomorphologiques de la région et la structure, permet de juger de ses variations dans le paysage, de délimiter les zones où elle est suffisamment homogène, et d'établir une carte schématique des terrains.

On peut représenter le déroulement de la démarche de la façon suivante (graphe 1):

Si l'on examine les différentes variables mises en cause dans cette étude, on remarque que la structure joue un rôle privilégié non seulement du fait de sa mise en évidence facile, mais parce qu'elle permet de mieux saisir les liens existants entre deux ensembles de variables entre lesquels elle joue le rôle de fonction de transfert.

Le premier ensemble est constitué par les variables *édaphique* (graphe 2). Il peut être subdivisé en trois parties : les variables relatives à la terre (matériau qui fait l'objet d'analyse), celles observées sur les profils de sol et enfin des caractéristiques du terrain,

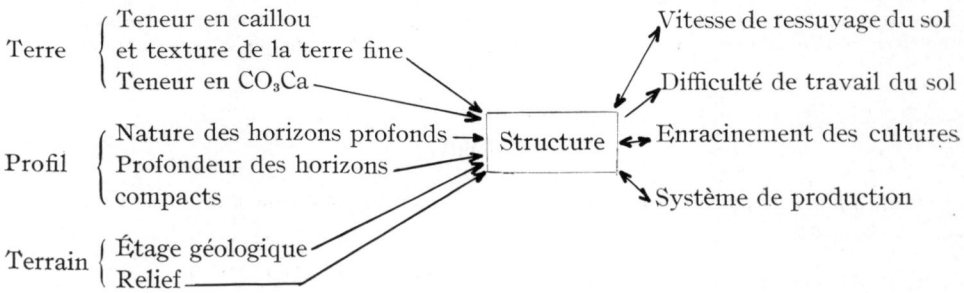
indiquées sur des documents cartographiques. Le second est composé de variables *agronomiques* qui peuvent être considérées comme des conséquences des précédentes sur le comportement du sol et des cultures ou sur le système de production.




Graphe 1

Le problème difficile à résoudre en agronomie est la détermination des relations existant entre le système complexe des facteurs et conditions qui caractérisent un sol et les comportements de celui-ci vis-à-vis des agents atmosphériques, des interventions techniques ou des végétaux.

Il apparaît ici que la structure, bien qu'enregistrée de façon très sommaire, intègre de façon satisfaisante diverses composantes du système sol ; elle sert de pont entre le support de la production et ses aptitudes et apparaît comme une charnière entre la pédologie et l'agronomie.




Graphe 2

Lors de l'observation du sol, on se contente en général de noter les caractères paraissant avoir une influence dominante sur son comportement ou celui de la plante. Cette étude montre que le relevé systématique de caractères de structure, leur grou-

pement en classes, même établies à partir d'appréciations qualitatives, permet d'effectuer une analyse relativement précise. La comparaison avec d'autres données, celles concernant le végétal en particulier, permet d'établir des conclusions objectives sur l'influence des états du sol, tels qu'ils sont mis en évidence par l'examen d'un profil pédologique ou d'un profil cultural, sur la végétation.

*Reçu pour publication en août 1970.*

## SUMMARY

### AN ATTEMPT TO CLASSIFY LAND IN AUNIS WITH REFERENCE TO ITS AGRICULTURAL VALUE

During a study of the agricultural potentialities of Aunis, a small natural region in the department of Charente-Maritime, some clay limestone soils, planted with cereal crops, sunflower and lucerne, were classified according to a simple structural feature : the size of the soil aggregates. This classification is in accordance with that of the agronomic properties of these soils (work ability, yield, method of cultivation) determined by investigation and with that of various pedologic characteristics (texture, depth of horizons) revealed by observing soil profiles. Thus we see that the concept of soil structure is an important link between land management and soil science.

## ZUSAMMENFASSUNG

### KLASSIFIZIERUNGS VERSUCH DER BÖDEN IN DER REGION AUNIS ENTSPRECHEND IHRER LANDWIRTSCHAFTLICHEN AUSNÜTZUNG

Im Rahmen einer Untersuchung der Landwirtschaftlichen Potentialitäten der Region Aunis, eines kleinen Naturgebietes des Departments Charente-Maritime, würden bestimmte mit Getreide, Sonnenblumen und Luzerne angebaute Ton Kalk-Böden mit Hilfe eines einfachem Strukturmerkmals : Grösse der Aggregate, eingeteilt. Diese Einteilung stimmt überein mit derjenigen, die durch Untersuchung bestimmter agrarwissenschaftlicher Eigenschaften der entsprechenden Böden (Bearbeitungseignung, Ertrag, Bodennutzungssystems) erhalten wurde und mit derjenigen, die auf den bei der Untersuchung der Bodenprofile entdeckten pedologischen Eigenschaften (Bodentextur, Tiefe der Horizonte) beruht. Danach ergibt sich, dass der Begriff Bodenstruktur eine enge Bezichung zwischen Agrarwissenschaft und Bodenkunde darstellt.

## РЕЗЮМЕ

*Опыт классификации почв района Онис для их сельскохозяйственного использования.*

Б. КОШАР, Ж. П. ДЕФФОНТЭН.

При изучении сельскохозяйственных возможностей провинции Онис, небольшого природного района департамента Приморской Шаранты, некоторые глинисто-известковые почвы занятые злаками, подсолнечником и люперной получили оценку с помощью простого структурного

критерия : размеры агрегатов. Классификация эта совпадает и с сельскохозяйственными признаками соответствующих почв, определенными при помощи анкет (легкость обработки, урожайность), и с их педологическими характерностями, найденными при изучении профилей. Таким образом доказывается что концепция структуры почвы, является важным связывающим звеном между агрономией и повчоведением.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CALLOT G., BARTHES J.-P., 1968. *Étude pédologique du Bassin de la Charente supérieure.* S. E. S.-E. N. S. A. Montpellier.

HÉNIN S., BOSQUET, 1964. Relation entre le comportement des sols et leur texture. *C. R. Acad. Agric.*, 842-846.

HÉNIN S., GRAS R., MONNIER G., 1969. *Le profil cultural.* Paris, Masson.

I. N. R. A. (S. E. I. Économie) - I. N. A.-A. D. A. C., 1969. *Étude technique et économique des systèmes de production en Aunis.* S. E. I.

VERDIER H., SILORET G., FRANC DE FERRIÈRE J., 1934. Les sols de Charente inférieure (relation entre la pédologie et les désignations locales). *Ann. Sci. agron.*

*Ann. agron.*, 1970, **21** (6), 777-817.

# ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA DÉSAGRÉGATION DU GRANITE (1)

M. ROBERT

*Laboratoire des Sols, Station centrale d'Agronomie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles*
*Institut national de la Recherche agronomique*

## RÉSUMÉ

Cette étude porte sur les premiers stades de l'évolution des roches granitiques qui se traduisent souvent par un simple désengrènement des minéraux constituants.

Il semble qu'à ce sujet, l'on ait surestimé l'intervention directe des facteurs physiques et que certaines actions chimiques limitées puissent avoir des effets désagrégeants beaucoup plus considérables.

Il en est ainsi lors de l'extraction du potassium des micas trioctaédriques : cette évolution « vermiculitisante », qui s'accompagne d'un gonflement des minéraux au sein de la roche, provoque une désagrégation intense et rapide des granites.

## INTRODUCTION

Les vingt dernières années ont vu se multiplier à travers le monde les études de pédologie expérimentale. Il semble en effet de plus en plus, que si les observations dans le milieu naturel apportent de nombreux éléments permettant de poser les problèmes, seule la méthode expérimentale paraît susceptible de fournir des références contrôlées qui conduisent progressivement à les résoudre.

C'est ainsi que *dans une première étape*, et en utilisant un modèle reproduisant le cycle de l'eau dans la nature, PEDRO (1966) a pu proposer, puis améliorer progressivement un système général qui permet de rassembler les principaux types chimiques de l'altération des roches à l'échelle du globe ; selon ce schéma, allitisation, monosiallitisation et bisiallitisation conduisent à partir des minéraux primaires des

(1) Extrait d'une thèse de Doctorat d'État soutenue à la Faculté des Sciences de Paris, le 21 mai 1970.

roches et suivant les conditions du milieu, aux principaux constituants secondaires rencontrés dans les formations superficielles et en particulier dans les sols.

Dans tous ces processus d'altération chimique, l'action de l'eau par hydrolyse constitue le facteur essentiel qui provoque une dépolymérisation plus ou moins intense des réseaux silicatés, et donc des remaniements importants des minéraux ou de la roche de départ. Mais, dans le cadre de ce schéma viennent se situer des mécanismes plus fins qui expliquent les nombreux aspects que présentent les phénomènes d'altération dans le milieu naturel. C'est pourquoi *dans une deuxième étape*, nous avons entrepris l'étude de processus *plus spécifiques* se déroulant au sein de solutions peu ou pas renouvelées et éventuellement à l'intérieur des matériaux eux-mêmes (microfissures...).

L'étude de tels processus nous apparaissait susceptible en effet, d'établir, d'une part, au niveau de la roche, le passage entre la désagrégation purement physique des roches et leur altération chimique, et d'autre part, au niveau des minéraux silicatés, de suivre leur transformation progressive sans destruction du réseau primitif. Ce travail comporte donc deux parties qui d'ailleurs se complètent.

— Une première partie qui fait l'objet de cet article concerne les modèles expérimentaux mettant en œuvre des *roches* (granites, et à titre de comparaison quelques autres roches).

— Une deuxième partie [1] au contraire où nous tenterons de préciser les mécanismes de transformation des *micas* qui apparaît comme le facteur essentiel de l'évolution des roches.

Ainsi, partant d'une caractérisation globale de l'évolution, nous serons amenés à en suivre les processus jusqu'à des niveaux de plus en plus élémentaires, c'est-à-dire finalement jusqu'à celui de la maille des phyllosilicates.

## LA DÉSAGRÉGATION DES ROCHES. DÉFINITION. REVUE SUR LES IDÉES ET ÉTUDES EXPÉRIMENTALES PRÉLIMINAIRES

L'observation du milieu naturel montre que les premiers stades de l'évolution des roches éruptives lorsqu'elles affleurent à la surface du globe, se traduisent toujours par un ameublissement plus ou moins net du matériel rocheux. C'est ce « passage d'un état massif à un état clastique » selon l'expression de POLYNOV (1937), qui caractérise l'altération superficielle et qu'on appelle encore le *weathering*.

Mais, il apparaît que si cette évolution est générale, elle peut néanmoins prendre des formes très diverses suivant les conditions du milieu et les facteurs d'évolution mis en jeu : nature de la roche, caractéristiques climatiques...

Ainsi, dans certaines conditions, on est en présence d'une décomposition chimique plus ou moins rapide des minéraux de la roche avec apparition concomitante de nouveaux édifices (constituants secondaires) qui sont toujours de très petite

[1] Cette deuxième partie fera l'objet de 2 autres articles.

dimension ($< 2\ \mu$), alors que dans d'autres conditions, on assiste à un simple désengrènement des minéraux primaires constituant la roche, et on parle alors de désagrégation.

Pour expliquer ces deux grandes voies de l'évolution, on a d'une manière classique fait appel à des facteurs de nature très différente faisant intervenir ou bien des actions strictement chimiques, ou bien des actions exclusivement mécaniques. Mais en réalité, dans la grande majorité des cas observés, il apparaît très difficile de relier un effet constaté, à une action précise.

Nous ne citerons à ce sujet que deux exemples relatifs à l'évolution des roches granitiques.

— Le premier concerne la formation des arènes granitiques dans les régions tempérées : on constate en général la présence d'une épaisse couche de matériel désagrégé pouvant aller d'un mètre à plusieurs dizaines de mètres où l'on retrouve tous les minéraux de la roche-mère avec une dimension avoisinant celle des sables (Collier, 1961 ; Dejou, 1967 ; Dejou, Pedro, 1967 ; Seddoh, 1969). Malgré les nombreuses hypothèses ou les nombreux travaux réalisés depuis Eskola (1930) jusqu'à l'heure actuelle, il n'est pas possible d'expliquer avec certitude une telle évolution par le jeu d'un facteur bien défini.

— Le deuxième exemple concerne une observation contrôlée de longue durée réalisée en case lysimétrique à Versailles.

En 1930, Demolon et Bastisse ont installé ainsi 800 kg de granite à deux micas préalablement broyés en fragments de 2 à 4 mm. Au bout d'une période de 30 ans, sous le climat de Versailles ($P_m \simeq 588$ mm; $T_m \# 10{,}3°C$) on obtient un matériel qui a la granulométrie suivante (Pedro, 1960) :

TABLEAU I

*Granulométrie de la case granite* (Versailles, 1960)

| 2 à 4 mm | 2 à 0,2 mm | 200 à 20 $\mu$ | 20 à 2 $\mu$ | $< 2\ \mu$ |
|---|---|---|---|---|
| 8,7 | 31 | 62 | 4,60 | 2,40 |

L'effet physique apparaît considérable ; par contre, l'effet chimique mesuré par la libération d'éléments (500 g pour 800 kg de granite, soit 0,6 p. 1 000) est relativement faible.

Ainsi, dans des conditions où n'agit normalement aucun facteur physique (tel que le gel ou la chaleur), mais simplement des facteurs climatiques qui, en général, produisent une évolution typiquement chimique, on obtient un effet de désagrégation considérable.

Ces deux exemples nous montrent qu'à l'aide des seuls concepts que nous avons invoqués, il apparaît difficile d'expliquer les données complexes du milieu naturel. Il nous a donc paru important de pousser l'analyse un peu plus avant, et tout d'abord de passer en revue l'influence de quelques facteurs classiquement cités comme étant responsables de la désagrégation des roches.

## I. — Action des facteurs physiques sur les roches

Pour qu'une roche se désagrège, il apparaît nécessaire de mettre en œuvre une certaine contrainte. Cette contrainte peut s'exercer à l'*extérieur de la roche*, au niveau du massif, par exemple : on observera alors une microfissuration de la roche (Dufaut, 1957) lors du relâchement de cette contrainte, qui peut se produire au cours de l'affleurement du massif en surface, ou même au cours du retrait d'un glacier qui recouvrait la roche.

Mais en général, pour expliquer les phénomènes de désagrégation, on est amené à faire intervenir des *contraintes intérieures* à la roche dont les causes peuvent être très diverses.

Parmi les plus classiquement invoquées, un certain nombre se révèlent pourtant inefficaces sur des roches éruptives à faible porosité (0,2 p. 100 pour le granite de Varennes).

— C'est le cas de l'action du gel qui nécessite une alimentation continue des cristaux de glace en formation.

— C'est le cas également des alternances de chauffage et de refroidissement (thermoclastie) lorsqu'elles se font à sec, comme le montrent les expériences de Blackwelder (1933) et de Griggs (1936) ; et même en présence d'eau, les résultats obtenus ne dépassent pas 0,5 p. 100 de roche désagrégée.

Si on remplace l'eau pure par des solutions de certains sels de calcium, magnésium, sodium (sulfate, chlorure, nitrate...), on peut espérer obtenir un certain effet par suite des pressions élevées (200 à 1 100 kg/cm²) susceptibles de se développer lors de la cristallisation des sels (Birot, 1947).

En fait, dans les conditions des expériences, la désagrégation certes plus notable que celle obtenue avec l'eau pure n'a pas dépassé 1 p. 100 pour un granite sain.

Par contre, si on passe des granites à des roches à porosité nettement plus importante ($\simeq$ 20 p. 100) comme la lave de Volvic, on constate déjà une intensification des effets obtenus (tabl. 2).

TABLEAU 2

*Désagrégation obtenue sur 2 types de roches de porosité différente*
(Pedro, 1957)

| Type de roche | Nature du traitement | Pourcentage de désagrégation (3 répétitions) | Valeurs extrêmes obtenues |
|---|---|---|---|
| Granite (porosité < 0,2 %) | eau pure | 0,13 | |
| | NaCl N | 0,52 | 0,12-0,25 |
| | $MgCl_2$ N | 0,18 | 0,31-0,40 |
| | NaCl + $MgCl_2$ | 0,36 | 0,49-0,54 |
| Lave de Volvic (porosité # 20 %) | Eau | 0,11 | |
| | NaCl N | 1,00 | 0,84-1,13 |
| | $MgCl_2$ N | 0,28 | 0,24-0,32 |
| | NaCl + $MgCl_2$ | 2,00 | 1,63-2,42 |

Dans certains cas enfin, où les traitements ont porté sur des gabbros ou des granites contenant un certain pourcentage de minéraux secondaires et donc sur des roches probablement plus altérées et à porosité élevée, les effets obtenus ont été plus intenses et ont pu même conduire à une dislocation complète de la roche (CAILLÈRE, BIROT et HÉNIN, 1954).

Donc à la suite de ces résultats, l'effet de cristallisation des sels ou « salz sprengung » apparaît en réalité comme très complexe.

Il est probable, d'une part, que pour exercer leur action mécanique, les sels doivent pouvoir se concentrer et cristalliser à l'intérieur même de la masse rocheuse ; or, ceci n'est pas possible dans le cas d'un granite sain à très faible porosité, mais le devient pour une roche à plus forte porosité initiale ou bien acquise lors d'une altération préalable ou prolongée de la roche.

D'autre part, dans certains cas où la désagrégation obtenue est très importante, on peut se demander si les sels employés à des concentrations assez élevées, n'ont pas une action chimique dont la part dans la désagrégation provoquée, reste à évaluer (cf. ci-après).

*Action de réactifs spéciaux* (artificiels). Plus récemment un autre effet a été mis en évidence expérimentalement (HÉNIN et PEDRO, 1957 ; PEDRO, 1959) : l'eau oxygénée employée dans des conditions qui peuvent être très variées (concentration 10 volumes à 110 volumes, températures 20° à 60°C) sur des fragments de granite ($\simeq$ 20 g) provoque une désagrégation très intense. Mais ce n'est que par une série d'expériences successives que le mode d'action de ce réactif a pu être précisé.

Ainsi, des expériences réalisées sur granite et sur lave de Volvic (tabl. 3) montrent que la désagrégation obtenue n'est pas en relation avec la porosité de la roche.

TABLEAU 3

*Désagrégation obtenue par des traitements $H_2O_2$*

| Type de roche | Poids initial (g) | Poids des particules libérées par $H_2O_2$ (g) | Pourcentage de la désagrégation |
|---|---|---|---|
| Granite (porosité $<$ 0,2 %) | 23,12 | 23,12 | 100 |
| Lave de Volvic (porosité $\simeq$ 20 %) | 33,76 | 0,012 | 0,03 |

Par contre, elle est en relation avec la présence de minéraux à la fois phylliteux et riches en fer ferreux comme les biotites.

La première hypothèse émise a donc fait intervenir une action oxydante de $H_2O_2$ venant modifier l'équilibre des charges à l'intérieur des micas riches en $Fe^{2+}$ et provoquer l'expulsion du potassium interfoliaire.

Nous avons repris quelques expériences sur un granite à biotite provenant de la région de Varennes (Annexe I), afin de préciser ce dernier point.

Les résultats présentés dans le tableau 4 montrent que si l'effet physique est im-

portant (désagrégation 1 p. 100 par traitement), la libération de potassium est très faible. Il en serait de même de l'oxydation du fer ferreux des biotites qui au cours des 13 traitements ne dépasserait pas 6 p. 100.

TABLEAU 4

*Effets de $H_2O_2$* (110 volumes à 60°C) *sur le granite de Varennes* (211 g en 10 fragments)

| Traitement (durée : 4 h) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Effet physique (désagrégation en % cumulée) | 1,1 | 3 | 4,8 | 5,7 | 6,1 | 6,8 | 7,6 | 8,7 | 10,7 | 11,2 | 12,2 | 13,6 | 16 |
| Effet chimique (libération cumulée de $K_2O$ en % du $K_2O$ total) | 0,05 | 0,09 | 0,14 | 0,18 | 0,23 | 0,27 | 0,29 | 0,34 | 0,38 | 0,42 | 0,45 | 0,49 | 0,53 |

L'évolution ne s'accompagne donc d'aucune modification chimique importante, même sur les micas, et d'aucune évolution minéralogique qui soit décelable par les méthodes physiques classiques, si ce n'est une certaine mordorisation des paillettes de micas.

L'eau oxygénée semble donc avoir une action beaucoup plus physique que chimique, qui se révèle capable de provoquer une désagrégation intense. On peut à ce sujet, supposer que la présence de phyllites ferrifères catalyse la décomposition de $H_2O_2$ et accélère la libération d'oxygène au contact des cristallites ; il en résulte un dégagement brutal qui, en provoquant la séparation de certains feuillets, conduit finalement à la dislocation de la roche.

Ce rapide tour d'horizon sur les principaux facteurs physiques nous amène à faire deux remarques essentielles :

*a*) il semble tout d'abord que les observations dans le milieu naturel ont conduit à surestimer l'importance de facteurs physiques typiques comme l'action de la température ou l'effet du gel ;

*b*) dès que l'on considère la mise en jeu de facteurs d'une autre nature qui sont susceptibles de provoquer expérimentalement une intense désagrégation, on est amené à supposer l'intervention de phénomènes de nature chimique à un stade ou à un autre de leur action.

Il apparaissait donc nécessaire, à ce point de l'analyse, de ne pas se contenter d'expression aussi générale que l'expression « action chimique » mais de voir ce que recouvre un terme de ce genre.

Nous allons donc envisager brièvement dans le paragraphe suivant les diverses modalités que peuvent présenter les actions chimiques sur les roches.

## II. — Les diverses formes d'action chimique

Les minéraux silicatés, qui constituent le granite et les roches primaires en général, ont une constitution complexe faisant appel à diverses catégories d'éléments ; on peut ainsi distinguer (Hénin, Pedro et Robert, 1968) :

— des éléments ayant une coordinence 4 ou 6 qui sont au centre de polyèdres d'anions (tétraèdres ou octaèdres) et que l'on peut appeler « éléments structuraux » (Si, Al, Fe, Mg) ;

— d'autres cations de coordinence 8 ou 12 comme les cations basiques (K, Na, Ca) qui remplissent un rôle de compensation des charges au niveau des réseaux et qui ne font pas partie de la carcasse structurale.

On peut donc envisager deux sortes d'action :

— soit une action globale portant à la fois sur la carcasse et les cations compensateurs ; c'est l'action chimique dans le sens classique du terme ;

— soit une action plus spécifique portant sur tel ou tel élément afin de *tenter de rompre préférentiellement tel ou tel type de liaison* au sein de l'édifice. C'est d'ailleurs là un mode d'action qui n'est pas envisagé habituellement lorsque l'on considère les phénomènes d'altération chimique.

Pour vérifier cet aspect de la question, nous avons été amenés à réaliser une série de modèles expérimentaux mettant en jeu des fragments de granite.

### 1. — *Action chimique globale*

Le processus impliqué dans ce type d'action est constitué essentiellement par l'action de l'eau ou hydrolyse, auquel on peut rattacher l'acidolyse qui se développe dans certaines conditions.

a) *Attaque hydrolytique.*

Pour réaliser ce processus, le modèle employé a été l'appareil Soxhlet qui dans son dispositif le plus simple réalise un passage répété d'eau distillée (≠ 3 l par jour à 60°C) sur les roches.

Nous ne reviendrons pas sur certains aspects chimiques ou minéralogiques qui ont été étudiés précédemment en détail par Pedro (1964).

Le granite de référence a été disposé en fragments de 20 g dans le manchon extracteur ; au bout d'une durée de 2 ans, il avait subi une évolution chimique relativement intense, puisque sur 248 g de granite mis en expérience, environ 5 g, soit environ 2 p. 100 du matériel étaient passés en solution. Dans ce « lessivat » on retrouve les éléments dans les proportions indiquées dans le tableau 5.

On constate en outre que certains éléments libérés s'individualisent sur place sous forme d'oxydes et d'hydrates métalliques (Fe Al).

Un tel traitement basé sur l'hydrolyse se traduit donc bien par une attaque globale et plus ou moins stœchiométrique des minéraux. Elle s'accompagne en général de la libération de mono-cristaux ou de globules de très petite taille ($< 2\ \mu$) qui traduisent un effet de microdivision des édifices sous l'effet de l'hydrolyse (Oberlin, Hénin et Pedro, 1958).

Par contre, si on considère les fragments désagrégés obtenus, l'évolution physique apparaît comme assez faible (tabl. 6).

L'action chimique globale sous sa forme la plus caractéristique, l'hydrolyse par l'eau, ne provoque donc pas un effet typique de désagrégation sur la roche, elle peut simplement transformer ses constituants en minéraux secondaires, donnant ainsi un ensemble plus friable.

TABLEAU 5

*Composition des lessivats de granite* (Soxhlet)

| Éléments exprimés en % d'oxydes (sur produit calciné) | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | MgO | CaO | $K_2O$ | $Na_2O$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1re année | 77 | 4,21 | 0,16 | 0,17 | 2,27 | 3,30 | 3,43 |
| 2e année | 75,1 | 3,93 | 0,23 | 0,37 | 1,76 | 4,20 | 3,63 |

TABLEAU 6

*Désagrégation obtenue lors du lessivage du granite*
(drainage 3 l/jour $t \neq 60°C$)

| | Poids des particules désagrégées (en g) | Désagrégation en % du poids de roche mis en expérience |
|---|---|---|
| 1re année..... | 0,812 | 0,33 |
| 2e année..... | 0,728 | 0,29 |
| Total ..... | 1,540 | 0,62 |

b) *Action acidolytique.*

En ce qui concerne l'attaque acidolytique, nous avons réalisé une expérience basée sur un modèle de type différent : la roche est mise au contact d'un milieu suffisamment concentré en protons pour n'avoir pas à renouveler les solutions comme nous l'avons fait précédemment ; les expériences ont donc été réalisées en système fermé en utilisant soit des solutions HCl N (ou 6 N), soit des résines H.

L'évolution s'est traduite dans ce cas par une mise en solution importante des éléments, en particulier Fe, Al, Mg, K, Ca... sans qu'aucune désagrégation ne se produise. Ainsi, après 2 mois de traitement sans renouvellement de la solution, on constate une diminution du poids de la roche mis en expérience qui atteint 12,76 p. 100 avec HCl 6 N et 15,56 p. 100 avec HCl 6 N + résine (placée dans l'eau dans les mêmes conditions, l'évolution aurait été quasi nulle). *Mais, cette diminution de poids s'effectue sans qu'il y ait diminution de la cohésion de la roche.* Toute l'évolution s'est donc produite essentiellement par attaque chimique, sans conséquence sur l'état physique de la roche mise en expérience.

*Conclusion.*

Nous retrouvons le même résultat pour les deux types d'actions chimiques envisagés : lorsque l'action des réactifs est trop globale, c'est-à-dire lorsqu'elle porte simultanément sur tous les éléments de la roche, le résultat se traduit essentiellement par une évolution chimique avec transformation des minéraux et libération d'un certain nombre d'éléments ; en outre, l'altération chimique prend alors le pas sur toute action de désagrégation.

### 2. — *Attaques chimiques sélectives*

Nous avons essayé d'opérer dans des conditions plus sélectives, c'est-à-dire que nous avons tenté d'agir respectivement et autant que possible indépendamment sur chacun des éléments constituant les édifices, qu'ils jouent un rôle au niveau de la carcasse, ou un rôle de cations compensateurs. On peut ainsi grâce à des réactions plus ou moins spécifiques :

— soit provoquer la formation de composés peu ionisés de certains éléments, c'est-à-dire des complexes (solubles) ou des précipités (insolubles) ;

— soit encore favoriser une réaction d'échange résultant de l'application de la loi d'action de masse en augmentant par exemple la concentration d'un élément dans la solution en contact avec la roche.

Nous réaliserons successivement ces deux types de réaction sur les différentes catégories d'éléments.

a) *Essais d'actions sélectives sur les éléments de la carcasse des minéraux silicatés.*

Trois types de réactifs ont été successivement envisagés :

*Action de réactifs spécifiques.*

Nous avons fait appel à une série de réactifs classiques utilisés dans le dosage des éléments. De plus, nous nous sommes placés dans les conditions les plus favorables, c'est-à-dire en présence de réactifs concentrés. Nous avons employé ainsi successivement l'aluminon comme réactif de l'aluminium, le ferricyanure et le nitroso-β-naphtol pour le fer, le molybdate d'ammonium pour la silice (CHARLOT, 1966).

Or, nous n'avons constaté aucun effet, ni physique, ni chimique sur la roche ; l'observation montre d'ailleurs qu'il n'y a pas extraction des éléments, mais fixation du réactif sur le matériau.

Tout se passe comme s'il y avait une compétition entre les forces maintenant l'élément dans le réseau et les actions s'exerçant à partir du milieu extérieur (fonction de la constante de stabilité du complexe éventuel).

*Action de réactifs moins sélectifs.*

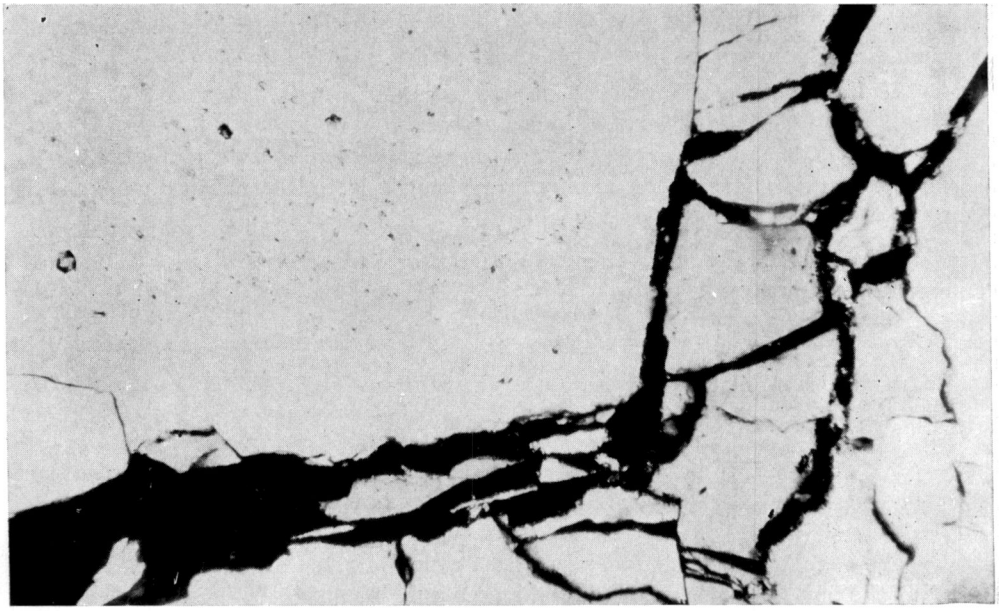
Si nous employons un réactif moins spécifique comme la forme disodique de l'EDTA en solution M/10, nous obtenons à la fois une action de désagrégation et une action de dissolution chimique de la roche (diminution de poids de l'échantillon global).

Nous reviendrons sur cette action de l'EDTA mais disons tout de suite que si nous effectuons des dosages dans la solution, nous retrouvons tous les éléments du

réseau de silicates, quelle que soit leur place dans la structure. Il y a donc dans ce cas-là, non plus fixation du réactif sur la roche, mais extraction des éléments.

*Action de l'acide oxalique.*

Une expérience moins globale et moins agressive que l'utilisation de l'EDTA a confirmé cette hypothèse. Il s'agit d'un essai de longue durée, réalisé à 80°C et utilisant de l'acide oxalique dilué N/10 000 (pH $\simeq$ 4) pour extraire le fer et le calcium. En un an, nous avons obtenu une extraction voisine de 1 p. 100 du $Fe_2O_3$ total de la roche (soit 20 fois le fer dit « libre » qui pourrait être extrait par la méthode DEB, 1950), mais sans aucun effet de désagrégation. Le fer extrait se dépose sur les plagioclases, et des lames minces examinées au microscope ont montré qu'il était capable de migrer à l'intérieur du granite en suivant les micro-fissures (cliché 1). Pourtant l'action est restée, là encore, essentiellement chimique.



CLICHÉ 1. — *Traitement du granite à l'acide oxalique ; pénétration du fer à l'intérieur des fragments*

Ces réactions portant sur les cations structuraux nous apparaissent régies en quelque sorte par une loi du type « tout ou rien ».

— Soit la force d'extraction du réactif n'est pas suffisante, et celui-ci se fixe sur le minéral.

— Soit le réactif est un complexant énergique, et il parvient alors à extraire les éléments structuraux. Mais il extrait aussi le reste et tout semble se passer alors sur un plan chimique, et d'une façon très analogue à l'acidolyse. L'effet obtenu sur la roche sera le même : il y aura dissolution et non pas désagrégation.

b) *Action sur le cation compensateur de divers aluminosilicates.*

Les essais ont porté sur un cation, le potassium, qui joue un rôle d'ion compensateur de charges dans les minéraux tels que micas et feldspaths.

— Afin d'extraire préférentiellement cet élément, nous avons choisi dans une première expérience un réactif gravimétrique classique, le cobaltinitrite de sodium ($K_S \# 10^{-10}$) et nous l'avons placé au contact de 10 fragments de granite.

Dès le premier traitement, on constate un *effet de désagrégation à la fois intense et rapide* et sans que le poids total de la roche mise en expérience (parties non désagrégées et parties désagrégées) ne diminue. En 15 traitements de 6 jours, nous avons ainsi obtenu une désagrégation totale du granite mis en expérience (tabl. 7) ; les fragments non désagrégés restants étaient constitués de quartz et de phénocristaux de feldspaths résistant à l'action du réactif (HÉNIN et ROBERT, 1964).

TABLEAU 7

*Traitement du granite par le cobaltinitrite de sodium*

(10 fragments, soit 209,3 g)

| Traitement (durée : 6 jours) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Poids total de particules libérées (en g) | 28,9 | 44,4 | 52,4 | 58,7 | 70,3 | 81,8 | 93,5 | 107,2 |
| Pourcentage total de désagrégation | 13,8 | 21,1 | 25 | 28 | 33,6 | 39,1 | 44,7 | 51,2 |

TABLEAU 7 *(suite)*

| Traitement (durée : 6 jours) | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Poids total de particules libérées (en g) | 127,8 | 130,6 | 139,6 | 151,7 | 157,3 | 160 | 175,5 |
| Pourcentage total de désagrégation | 61,1 | 62,4 | 66,7 | 72,5 | 75,2 | 76,5 | 84 |

— Dans un deuxième type d'expériences, nous avons tenté de provoquer une rupture d'équilibre en augmentant la concentration en cation dans la solution en contact avec la roche. Nous avons utilisé à cet effet, des solutions de NaCl N, donc à la même concentration que dans les expériences de « salzsprengung », mais les expériences se sont déroulées à 80°C *sans dessiccation*, et en renouvelant les solutions toutes les semaines. En examinant les résultats rassemblés dans le tableau 8, il est aisé de faire ressortir qu'à chaque traitement partiel, on obtient à la fois une libération importante de $K_2O$ et une certaine désagrégation, qui varie entre 0,1 et 0,6 p. 100 du poids de roche mis en expérience.

Un tel résultat s'oppose à ceux exposés au cours des expériences précédentes, puisque pour une altération chimique réduite, et limitée en apparence à une sortie du potassium des réseaux, on se trouve en présence d'un effet notable de désagrégation.

TABLEAU 8

*Traitement du granite par NaCl N*

| Traitement (6 jours) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Désagrégation totale en % ..... | 0,13 | 0,46 | 0,80 | 1,33 | 1,93 | 2,39 |
| Libération totale de $K_2O$ en % ..... | 0,49 | 0,97 | 1,43 | 1,96 | 2,46 | 2,93 |

## CONCLUSION

Nous avons rassemblé dans le tableau 9, les résultats obtenus aux différentes expériences, et nous en tirerons un certain nombre de remarques.

— Mettons tout d'abord à part l'action très intense de $H_2O_2$ qui s'explique sans doute par l'intervention directe de pressions gazeuses au niveau des paquets de feuillets des biotites. Si ce traitement peut être très utile pour apprécier l'aptitude d'une roche à se désagréger, on voit assez mal actuellement, comment il pourrait s'appliquer au domaine naturel.

— Si on considère les autres traitements faisant intervenir des facteurs physiques et qui sont cités classiquement dans la littérature (action du gel ou des sels), il semble que leur efficacité soit subordonnée à une pénétration dans la masse de la roche, pénétration qui est à l'origine de la contrainte exercée. Or celle-ci, dans des roches granitiques saines à faible porosité, apparaît difficile, à moins qu'une action chimique intervienne corrélativement.

— Les premières expériences que nous avons entreprises montrent que pour être efficace sur la désagrégation, l'action chimique doit se faire dans des conditions bien déterminées. Ainsi, si l'action revêt un caractère global et intéresse *tous* les éléments de la roche (hydrolyse intense, acidolyse, formation de complexes polyvalents), l'aspect « dissolution » l'emportera sur l'aspect « désagrégation ».

Par contre, si l'action porte spécifiquement sur certains cations comme le potassium qui semble jouer un rôle très important dans le maintien de la stabilité des structures (cation compensateur de charge dans les feldspaths et cation interfoliaire dans les micas), l'effet de désagrégation devient le processus dominant (ROBERT, 1966).

Ainsi, nous avons mis en évidence, au cours de ces premières expériences, un processus nouveau d'évolution, de nature chimique, mais provoquant avant tout un effet de désagrégation des granites. Nous allons maintenant entreprendre une étude plus détaillée de ce phénomène.

TABLEAU 9

*Évolution du granite au cours de différents traitements*

| Type de traitement | | Durée | Effet physique (désagrégation maximum en % de roche mise en expérience) | Effet chimique en % d'élément libéré ou en % de roche dissoute |
|---|---|---|---|---|
| Alternances humectations-dessiccations (eau pure) | | 4 mois | 0,04 maximum 0,13 | Pas apprécié (libération de quelques mg de produit) |
| Effet de cristallisation des sels ($CaSO_4$, $NaNO_3$, NaCl) | | 4 mois | 0,14<br>0,79<br>0,10-0,50 (L'effet pourrait par contre être considérable sur un granite altéré) | Pas apprécié directement, mais peut être estimé en considérant l'action de NaCl N |
| Action de $H_2O_2$ électrolytique pH 3,5 | | 13 traitement de 4 heures | 33,69<br>Produit désagrégé sableux | Libération $K_2O$ 0,53 %<br>oxydation faible |
| Hydrolyse en Soxhlet pH 6,5 | | 2 ans passage de ≠ 1 800 l d'eau | 0,62 % ± grossier + particules fines microcristaux, globules | 2 % dissous |
| Acidolyse HCl 6 N<br>HCl 6 N + résine | | 2 mois<br>(sans renouvellement) | Néant | 12,76 dissous<br>15,56 dissous |
| Action de EDTA complexants M/10 | | 9 traitements de 6 jours | 1,7 % | $K_2O$ libéré 8 %<br>Dissolution 4,5 % |
| Action sur le potassium | NaCl N à 80°C | 6 traitements de 6 jours | 2,4 %<br>Produit de désagrégation ± grossier | $K_2O$ 2,93 % du $K_2O$ total de la roche |
| | Cobaltinitrite de Na à 25°C | 15 traitements de 6 jours | 84 % | $K_2O$ extrait voisin de 16 % du $K_2O$ total |

# ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA DÉSAGRÉGATION DU GRANITE PAR EXTRACTION SÉLECTIVE DU POTASSIUM

Nous allons ici tenter de préciser le phénomène et d'en définir les limites en utilisant une série de réactifs susceptibles d'agir par échange sur les minéraux. Nous distinguerons comme nous l'avons fait précédemment les traitements provoquant une réaction de précipitation, et ceux où le cation ne précipitant pas, il sera nécessaire de procéder à un renouvellement périodique des solutions.

## I. — Action de réactifs précipitants

Nous avons choisi parmi les composés peu solubles du potassium, ceux dont les constantes d'équilibre sont les plus élevées (tabl. 10).

TABLEAU 10

*Réactifs gravimétriques du potassium*

| Réactif | Formule du composé potassique | Constante d'équilibre | Conditions d'emploi |
|---|---|---|---|
| Cobaltinitrite de sodium | $K_2NaCo(NO_2)_6$ | 10,7 | En milieu tamponné acétique pH $\#$ 4 réaction oxydante |
| Tétraphénylborate de sodium | $KB(C_5H_6)_4$ | 7,5 | En milieu NaCl pH $\#$ 8 réaction neutre ou réductrice |
| Acide tartrique | $KHC_4H_4O_6$ | 3,5 | En solution saturée 150 g/500 cm$^3$ |

Dans un premier temps, nous avons repris sous une forme plus détaillée l'étude de l'action sur le granite de 2 réactifs gravimétriques du potassium : le cobaltinitrite de Na qui avait servi dans les expériences préliminaires, et le tétraphénylborate de Na ($K_S \# 10^{-1}$).

Ces réactifs ont des propriétés très différentes, soit en ce qui concerne les phénomènes d'oxydo-réduction (le 1$^{er}$ étant oxydant, le 2$^e$ réducteur), soit en ce qui concerne le pH d'utilisation (le 1$^{er}$ est utilisé en milieu acétique tamponné à un pH $\#$ 4, le 2$^e$ en pH alcalin).

Toutes les expériences ont été réalisées à la température ambiante ($t \# 25°C$) sur des fragments de granite d'un poids moyen de 20 g.

1. — *Résultats obtenus sur le plan de la désagrégation*

Nous avons rapporté précédemment les résultats d'une première expérience utilisant le cobaltinitrite de sodium : en 15 traitements, nous étions parvenus à une désagrégation quasi totale de la roche. Mais avec ce réactif, on pouvait supposer que la désagrégation obtenue résultait d'un certain effet mécanique par dégagement éventuel de $NO_2$ ; il était donc important de confirmer un tel résultat avec un réactif du même type, le tétraphénylborate. Nous avons reporté les résultats obtenus lors de ces traitements comparatifs dans le tableau 11.

TABLEAU 11

*Traitements comparatifs par 2 réactifs gravimétriques du potassium*

| Tétraphénylborate | | | | | Cobaltinitrite | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Traitements 4 jours | Poids au départ (g) | Poids des particules libérées à chaque traitement (g) | Poids total des particules libérées (g) | Désagrégation (%) | Traitements | Poids au départ (g) | Poids des particules libérées à chaque traitement (g) | Poids total des particules libérées (g) | Désagrégation (%) |
| 1 | 22,06 | 0,38 | 0,38 | 1,7 | 1 | 20,68 | 0,57 | 0,57 | 2,7 |
| 2 | 21,68 | 0,13 | 0,51 | 2,8 | 2 | 20,11 | 0,15 | 0,72 | 3,4 |
| 3 | 21,55 | 0,15 | 0,66 | 3,0 | 3 | 19,96 | 1,21 | 1,93 | 9,3 |
| 5 | 21,31 | 0,10 | 0,85 | 3,8 | 5 | 17,58 | 2,91 | 6,01 | 29,0 |
| 6 | 21,21 | 0,08 | 0,93 | 4,2 | 6 | 14,67 | 0,13 | 6,14 | 29,7 |

On peut aisément constater que si le cobaltinitrite se montre plus efficace, le tétraphénylborate provoque néanmoins une évolution du même genre. Les résultats granulométriques concernant les fractions désagrégées sont reportés dans le tableau 12. Ils confirment pour les 2 réactifs l'importance de la désagrégation obtenue, qui se manifeste non seulement par une dislocation de la roche et par une dissociation des minéraux, mais également par une division de ces minéraux (1).

TABLEAU 12

*Granulométrie des produits désagrégés obtenus*

| Fractions | > 2 mm | 2-1 mm | 1-0,5 mm | 0,5-0,002 mm | < 0,002 mm |
|---|---|---|---|---|---|
| Traitements au tétraphénylborate .. | 3,7 | 8,5 | 12,7 | 66,3 | 8,8 |
| Traitements au Cobaltinitrite ..... | 18.7 | 19,5 | 15,7 | 39,4 | 6,7 |

(1) Cette division apparaît d'ailleurs plus marquée lors des traitements par le tétraphénylborate.

La désagrégation ne semble donc pas liée à première vue aux conditions de pH, de rH, ou au dégagement de $NO_2$. Elle est, de ce fait, à mettre essentiellement sur le compte de l'extraction préférentielle du potassium.

2. — *Résultats obtenus sur le plan chimique et minéralogique*

Pour la première expérience, avec désagrégation totale du granite, 1/6 du $K_2O$ contenu dans les 210 g de granite a été libéré en 90 jours. Dans la seconde (expérience comparative), à chaque traitement, l'extraction porte sur 0,6 à 2 p. 100 du $K_2O$ total du granite. Il y a donc bien une corrélation entre la désagrégation et le potassium libéré de la roche.

L'examen à l'aide des rayons X de la fraction fine des produits de désagrégation montre que l'évolution porte sur les micas. Cette évolution se traduit par une ouverture des feuillets dont l'équidistance apparente (001) passe de 10 Å à des distances voisines de 12 Å (forme Na). Cette réflexion après chauffage à 400°C revient à 10 Å (test caractéristique pour un édifice de type vermiculite). Ce comportement, confirmé par des courbes thermiques, traduit donc une évolution de la biotite du granite en vermiculite.

3. — *Conditions limitant l'évolution*

L'évolution apparaît donc comme étant commandée par l'extraction du potassium et par sa précipitation immédiate dans le milieu extérieur.

— La première condition nécessaire à l'évolution sera assurée par l'existence d'une certaine valeur du produit de solubilité du composé potassique. A la suite des essais que nous avons effectués, la réaction est très rapide avec le cobaltinitrite et le tétraphénylborate de Na dont le $K_S$ est supérieur à $10^{-7}$ ; elle est plus lente avec l'acide tartrique par exemple, et pratiquement inexistante avec un réactif comme la dipicrylamine où seule une croissance très lente de cristaux de dipicrylaminate peut être constatée sur les fragments de granite.

— Une autre condition aura trait à l'agressivité chimique générale du réactif. Ainsi, les essais avec l'acide tartrique provoquent une désagrégation qui n'était pas obtenue avec d'autres acides (HCl, acide oxalique...), mais elle s'accompagne aussi d'une certaine solubilisation de la roche. L'acide tartrique a un double rôle : c'est un réactif gravimétrique de K grâce à la formation d'un précipité de tartrate acide de K ($KHC_4H_4O_6$), mais il donne également des complexes avec Fe et Al et exerce une action d'acidolyse sur les minéraux (présence de 2 groupements COOH).

## II. — Action des sels solubles

Il est évident que de tels réactifs spécifiques du potassium n'existent pas sous cette forme dans le milieu naturel. On peut cependant déjà imaginer que les plantes, du fait de leurs besoins spéciaux en $K_2O$, jouent dans certaines conditions un rôle un peu analogue à ces réactifs. Il était donc nécessaire de généraliser cette action de désagrégation consécutive à une libération de $K_2O$ en employant des réactifs *moins* spécifiques.

En effet, si on analyse l'effet des réactifs précipitants, on peut distinguer deux phases : une phase « d'échange » entre le minéral et la solution et une deuxième phase où le potassium extrait précipite dans la solution. On peut supposer que la première phase se réalise selon la réaction :

$$\text{Mica} + \text{solution de Na} \rightarrow \text{Mica Na} + \text{solution de K}$$

et on voit ainsi que le facteur essentiel sur lequel on peut jouer est la concentration en cations de la solution externe.

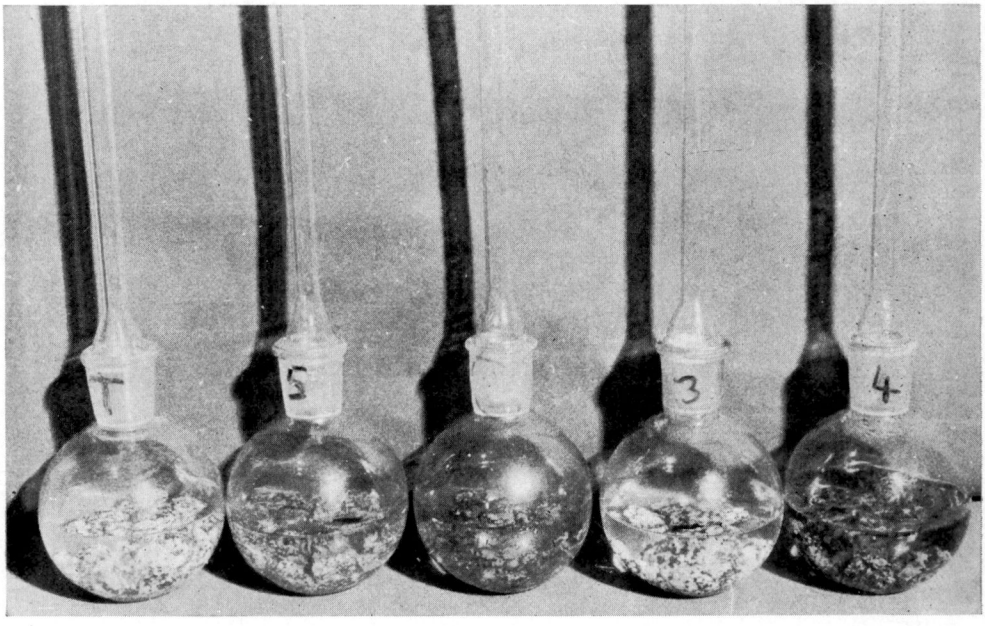
Dans une expérience préliminaire, nous avons employé différents réactifs dont la nature et les caractéristiques sont précisées dans le tableau 13.

TABLEAU 13

*Différents traitements réalisés sur les fragments de granite*

| Nature du traitement | Concentration | pH |
|---|---|---|
| Témoin eau distillée ..... | | 5,6 |
| $Mg(NO_3)_2$ ..... | N | 5,6 |
| $NiCl_2$ ..... | M/10 | 4,7-final 3,8 à 4 |
| $C_2O_4H_2$ ..... | $10^{-4}$N | Ajusté à 4 |
| $Mg(NO_3)_2 + C_2O_4H_2$ ..... | N (en Mg) | Ajusté à 4 avec $C_2O_4H_2$ $10^{-4}$N |

Au cours de chaque traitement, 10 fragments de granite (poids moyen de chaque fragment = 20 g) étaient mis en présence de 500 cm³ de solution dans des ballons munis d'un réfrigérant vertical (cliché 2). La température était maintenue voisine




CLICHÉ 2. — *Dispositif expérimental.*

TH : traitement par l'eau
5 : traitement par $C_2O_4H_2$
2 : traitement par $Mg(NO_3)_2 + C_2O_4H_2$
3 : traitement par $Mg(NO_3)_2$
4 : traitement par $NiCl_2$

TABLEAU 14

*Désagrégation obtenue*

| Traitements | 13 traitements de 4 jours | | | | 9 traitements de 1 mois + 9 traitements de 4 jours | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Matériel désagrégé | | $K_2O$ libéré | | Matériel désagrégé | | $K_2O$ libéré | |
| | En g | En % de la roche initiale | mg/l | En % du $K_2O$ de la roche | En g | En % de la roche initiale | mg/l | En % |
| $Mg(NO_3)_2 + C_2O_4H_2$ ..... | 37,2 | 17,2 | 900 | 9,5 | 93 | 32 | 2 000 | 15,7 |
| $Mg(NO_3)$ ..... | 29,7 | 13,7 | 720 | 7,5 | 79,7 | 27,5 | 1 515 | 12 |
| $NiCl_2$ ..... | 25,7 | 13,2 | 630 | 7,3 | 54,4 | 18,7 | 1 440 | 11,3 |
| $C_2O_4H_2$ ..... | 1 | 0,45 | 80 | 0,8 | 3,5 | 1 | 105 | 1 |
| Témoin à l'eau ..... | 0,4 | 1,4 °/oo | 7 | 0,55 °/oo | 0,5 | 1,8 °/oo | 23 | 2,2 °/oo |

de 80°C. Nous avons renouvelé les solutions soit tous les 4 jours, soit tous les mois. Les parties désagrégées ( < 5 mm) étaient retirées à chaque traitement et quelques dosages étaient effectués (K, Ca, Fe).

L'évolution a été caractérisée en considérant, comme dans les expériences précédentes, les aspects physique, minéralogique et chimique.

### 1. — *Mise en évidence et caractérisation globale du phénomène*

a) *Caractérisation de l'évolution sur un plan physique.*

Le tableau 14 nous donne les résultats obtenus lors des différents traitements en ce qui concerne la désagrégation (en p. 100).

On constate immédiatement que l'eau et l'acide oxalique provoquent une évolution physique infime. Par contre, en présence de solutions salines, l'allure générale de l'évolution et cela, quelle que soit la durée des traitements, aboutit à une désagrégation importante de la roche. Seule l'intensité varie, d'une part, avec la durée (4 jours ou 1 mois), d'autre part, avec le sel employé.

A ce sujet, notons l'effet de synergie assez important que l'on obtient par l'addition d'acide oxalique en faible quantité à des solutions de $Mg(NO_3)_2$, puisqu'il y a dans ce cas une nette augmentation du potassium libéré et du pourcentage de la désagrégation (effet de synergie sans doute dû à l'introduction d'ions $H^+$ dans le milieu) (cf. MAMY, 1969).

Nous avons essayé, en outre, de caractériser l'évolution par des études plus fines effectuées d'une part, sur la fraction désagrégée (étude granulométrique) et d'autre part, sur les fragments de roches après traitement (mesure de porosité).

La partie désagrégée est séparée à chaque renouvellement. A la fin, l'étude granulométrique effectuée fait apparaître les résultats suivants (tabl. 15) :

TABLEAU 15

*Composition de la fraction désagrégée*

| Diamètre | > 2 mm | 0,2-2 | 20 μ à 200 μ | 2 μ à 20 μ | < 2 μ |
|---|---|---|---|---|---|
| Matériaux provenant de l'arénisation expérimentale en % ..... | 39 | 49 | 9,6 | 2,4 | |
| Arène développée sur le granite de Varennes en % (COLLIER, 1951).. | 48,9 | 34,7 | 8,1 | 3,8 | 3,8 |

Notons à ce sujet la similitude frappante existant entre la granulométrie des particules provenant de la désagrégation expérimentale et celle de l'arène développée sur le même granite de Varennes dans le milieu naturel.

D'autre part, si nous considérons les fragments de roche subsistant après traitement, nous constatons une évolution qui se traduit par une diminution de la densité et une augmentation de la capacité de rétention en eau (tabl. 16).

TABLEAU 16

*Caractérisation des fragments non désagrégés*

| Roche | Densité apparente | Densité réelle | Porosité (%) | Rétention maximum en eau (sous vide) |
|---|---|---|---|---|
| Granite initial ..... | 2,73 | 2,735 | < 0,2 | 0,55 % du volume apparent |
| Granite traité par $Mg(NO_3)_2 + C_2O_4H_2$ ..... | 2,64 | 2,735 | 3,5 | 2,16 % du volume apparent |

Nous constatons donc que l'évolution engendrée se manifeste non seulement par une désagrégation conduisant à un matériel à dominante sableuse, mais également par une modification des propriétés physiques des fragments de roches.

b) *Caractérisation de l'évolution sur le plan minéralogique et chimique.*

Les études minéralogiques réalisées par l'intermédiaire de la diffraction des rayons X ont abouti en ce qui concerne les traitements par les solutions salines aux mêmes résultats que lors des essais en présence de réactifs précipitants. La seule évolution minéralogique nette intéresse les micas, dont les cations interfoliaires K sont remplacés par Ni et Mg hydratables. Les équidistances interfoliaires (001) passent alors de 10 Å à des valeurs voisines de 14 Å.

L'action de l'acide oxalique est, par contre, assez ménagée ; elle est uniquement chimique et de type classique et porte surtout sur le fer. L'eau dans les conditions de renouvellement où nous l'avons employée, ne provoque qu'une réaction chimique et physique infime du granite (tabl. 14). Il faudrait envisager un renouvellement de l'eau en contact beaucoup plus fréquent pour que les effets d'hydrolyse se fassent ressentir. Par contre, en utilisant des solutions salines, on retrouve bien une action comparable à celle obtenue sur le granite avec les 2 réactions gravimétriques.

L'évolution minéralogique et physique de la roche est donc bien à relier à une extraction sélective du potassium, et les réactifs susceptibles d'intervenir apparaissent comme étant beaucoup plus variés qu'on pouvait le penser *à priori*.

### 2. — *Développement du phénomène. Extraction du potassium et rôle des différents facteurs*

Afin de préciser l'allure du phénomène et les conditions de l'évolution, nous avons suivi plus en détail l'extraction du potassium en fonction du temps.

a) *Libération du potassium.*

Libération au cours d'un traitement. — Si nous considérons par exemple le traitement de 10 fragments de granite par 500 cm³ de $MgCl_2$ N (pH 5,6), la libération

est très rapide et pratiquement linéaire pendant les 2 ou 3 premiers jours ; puis, la courbe tend vers un palier (fig. 1).

Ce phénomène, constaté avec $MgCl_2$ N, est encore plus net avec une solution NaCl N où le palier est atteint au bout de 24 heures. A ce palier, on peut considérer que l'on se trouve à une sorte d'équilibre roche-solution.

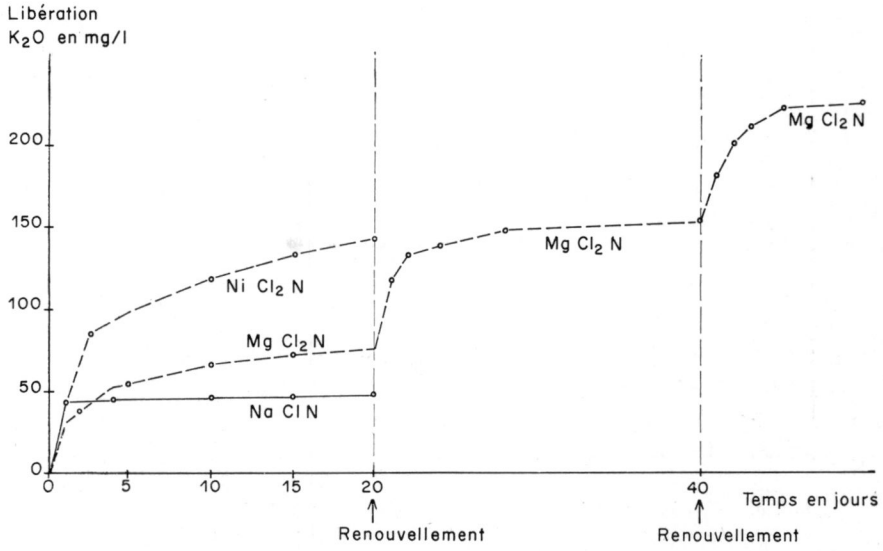



FIG. 1. — *Libération du potassium au cours des différents traitements*

Au cours d'un traitement, l'extraction du potassium se bloque d'elle-même quand le rapport $\frac{(K)}{(\text{cation du traitement})}$ atteint une certaine valeur dans la solution.

Il est à noter cependant que si le traitement se caractérise par la mise en œuvre d'un sel hydrolysable comme $NiCl_2$ N, cet équilibre est beaucoup plus difficile à mettre en évidence : la libération de protons semble donc permettre la poursuite de la réaction. Il en serait de même si on ajoute des protons (sous forme d'acide oxalique) à une solution saline ($MgCl_2$ N).

— Si, en revanche, on renouvelle la solution d'attaque, l'extraction de $K_2O$ pourra se poursuivre et être alors, à chaque fois, aussi intense que lors du premier traitement. C'est donc bien la concentration en potassium dans la solution extérieure qui intervient pour limiter l'évolution au cours du traitement.

Dans les premières expériences, les renouvellements étaient réalisés tous les mois. En fait, pour des sels non hydrolysables, le renouvellement peut intervenir dès que la libération amorce un palier, c'est-à-dire tous les 4 à 5 jours. On obtient ainsi toute une série d'extractions successives (fig. 1). Si on reporte ensuite sur un graphique les différents chiffres obtenus, exprimés en p. 100 du $K_2O$ total de la roche mise en expérience, on constate que la libération est strictement *linéaire* en fonction du temps (ou du nombre de traitements) (fig. 2, courbe supérieure concernant $MgCl_2$ N).

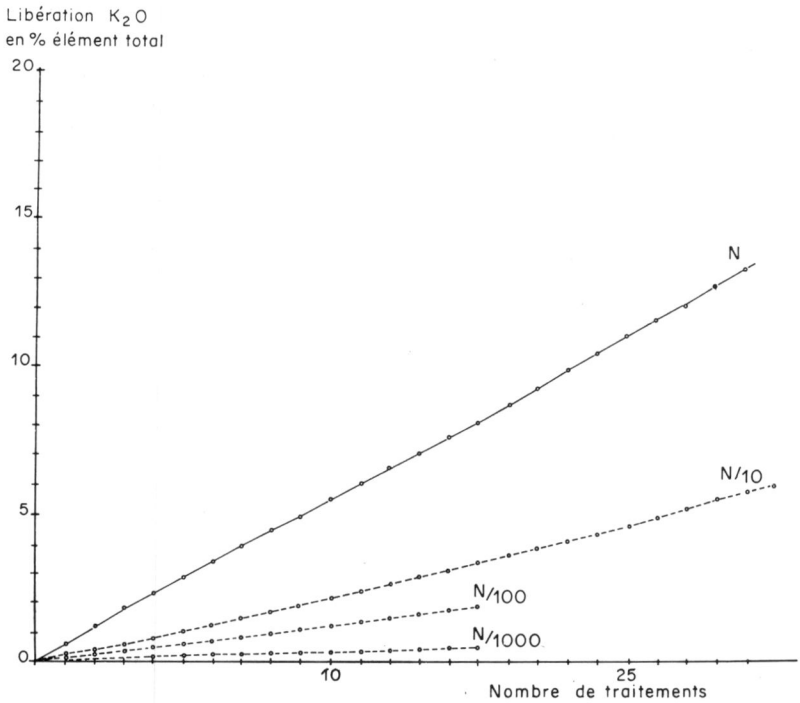



FIG. 2. — *Influence de la concentration en $MgCl_2$ sur la libération du potassium*
(100 p. 100 correspond à la teneur initiale en $K_2O$ du mica)

b) *Facteurs limitant l'évolution.*

*Concentration en cations de la solution.*

Nous venons de voir que l'évolution au cours d'un traitement est limitée par la quantité de potassium libéré : on peut mesurer facilement cette concentration limite et constater qu'elle est la même au cours des différents renouvellements, pour un sel de nature et de concentration données.

Par contre, si on réalise les mêmes expériences que précédemment (même poids de roche), mais en faisant varier la concentration de la solution (N, $10^{-1}$, $10^{-2}$, $10^{-3}$N), on s'aperçoit que la concentration limite en K qui bloque la réaction varie considérablement suivant les cas. Nous avons reporté dans le tableau 17 quelques-unes de ces valeurs comparées avec les concentrations d'équilibre obtenues pour un traitement par l'eau ou par un acide très dilué.

TABLEAU 17

*Valeurs des concentrations en $K_2O$ bloquant la réaction d'échange*
(250 g de roches)

| Traitement | $MgCl_2$ N | $MgCl_2$ N/10 | $MgCl_2$ N/100 | $MgCl_2$ N/1 000 | Eau distillée | $C_2O_4H_2$ $10^{-4}$N pH ≠ 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $K_2O$ en mg/l. | 68 | 28 | 14 | 4,6 | 0,6 | 6 |

La libération de $K_2O$ au cours des traitements a été reportée sur un graphique (fig.2) : on peut constater qu'elle devient très faible pour une solution N/1 000. *L'évolution est donc sous la dépendance directe de la concentration en cation de la solution d'attaque.*

En revanche, et c'est là un point très important, on ne constate pas de phénomène de saturation ou de vieillissement du système : l'évolution ne semble dépendre que du rapport des concentrations des ions en *solutions*, mais pratiquement pas des ions fixés sur le minéral (K et Na).

*Nature du cation.*

Nous avons réalisé une série d'expériences en utilisant des sels de même type (chlorures), mais avec des cations différents : KCl, $NH_4Cl$, $MgCl_2$, $CaCl_2$. Il se révèle que KCl, comme on pouvait s'y attendre, ne conduit à aucune évolution sensible sur le plan physique ; mais il en est de même pour $NH_4Cl$.

Si on considère les rayons ioniques, on s'aperçoit que les cations monovalents de grande taille ($r > 1$ Å) bloquent la réaction contrairement aux cations bivalents. Il est d'ailleurs à noter que la première catégorie de cation est peu hydratable par rapport à la deuxième catégorie de cation qui l'est beaucoup plus. La nature du cation (et ses propriétés) sera donc un des principaux facteurs limitant ce type d'évolution. Il est cependant à noter que l'évolution est possible avec les cations les plus courants se trouvant dans les solutions à la surface du globe, c'est-à-dire : Ca, Mg, Na.

*Nature de l'anion.*

Au cours des nombreuses expériences effectuées, nous avons pu facilement vérifier, que l'anion, s'il est inactif (en ce qui concerne la formation des complexes) ne joue pratiquement aucun rôle dans la libération du $K_2O$. Ainsi, les expériences utilisant des nitrates ou des chlorures donnent des résultats très semblables.

Il n'en sera pas de même si l'anion est actif chimiquement et en particulier s'il est doué de propriétés complexantes. Ce sera le cas, par exemple, du sel disodique de l'éthylène diamine-tétra-acétique (EDTA) : avec ce sel, nous sommes en présence à la fois d'une forte concentration en cations (Na) qui vont pouvoir agir sur le K des micas (fig. 3) et d'un type d'anion qui va se révéler capable de former des complexes avec *tous* les éléments de la roche : Al, Fe, Mg, Ca... Cette extraction des éléments du réseau est alors un peu analogue à une attaque acide.

La figure 4 concerne une expérience comparative, utilisant l'EDTA et le citrate de sodium à même concentration en sodium (N/10), sur 100 g de granite.

Nous avons reporté pour chaque traitement, d'une part l'action chimique (poids de roche dissoute), d'autre part l'action physique (fragments fins désagrégés) en exprimant les résultats en pourcentage du poids de roche mise en expérience.

On constate que pour l'EDTA, complexe polyvalent, c'est la dissolution qui l'emporte très nettement alors que pour le citrate, c'est la désagrégation qui est prépondérante et qui va d'ailleurs en s'amplifiant au fur et à mesure du nombre des traitements.

Cette expérience illustre donc bien la compétition qui semble exister sur le plan des phénomènes entre une action chimique globale et une action de type physique.

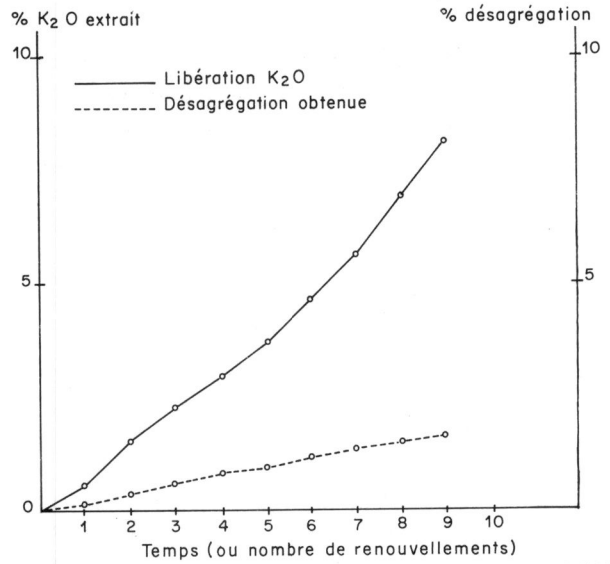



FIG. 3. — *Comportement du granite en présence de l'EDTA M/10*

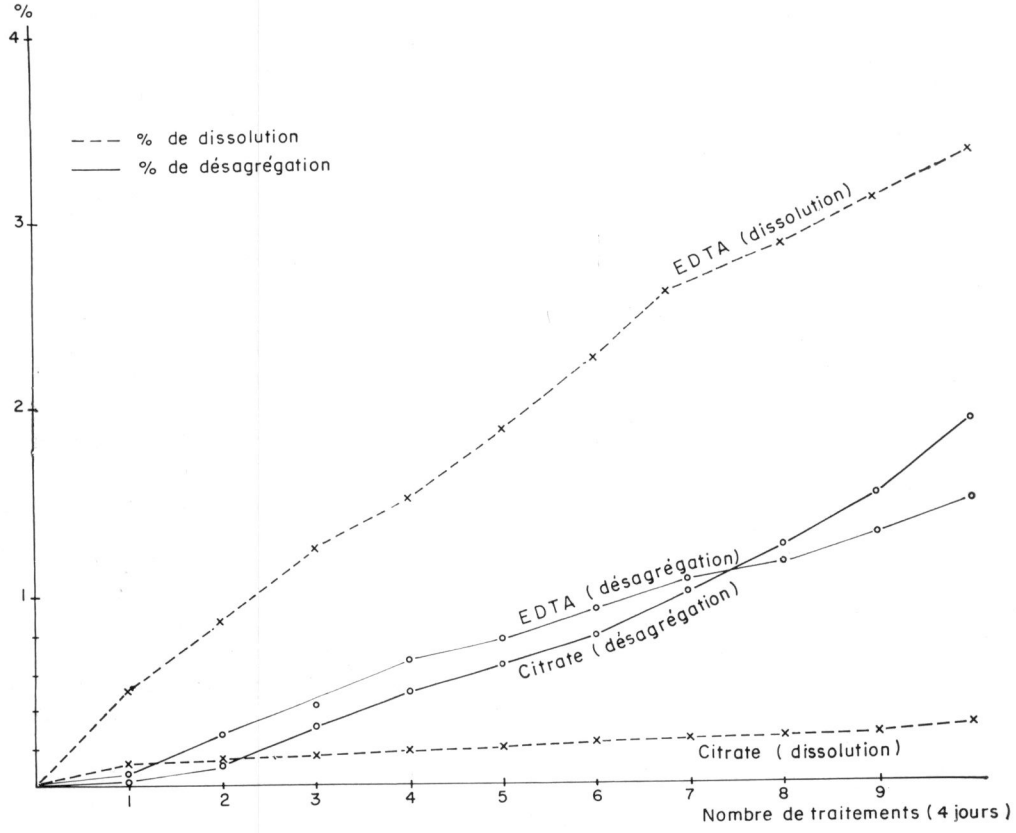



FIG. 4. — *Fréquence comparative sur granite avec EDTA N/10 et citrate Na N/10*

## III. — Considérations sur le parallélisme entre l'évolution chimique engendrée et l'effet de désagrégation

A chaque renouvellement de la solution (4 à 5 jours), nous avons retiré et pesé les fragments désagrégés et nous avons reporté ces résultats (transformés en p. 100 du poids de roche mis en expérience) sous forme de graphiques. Sur le premier type

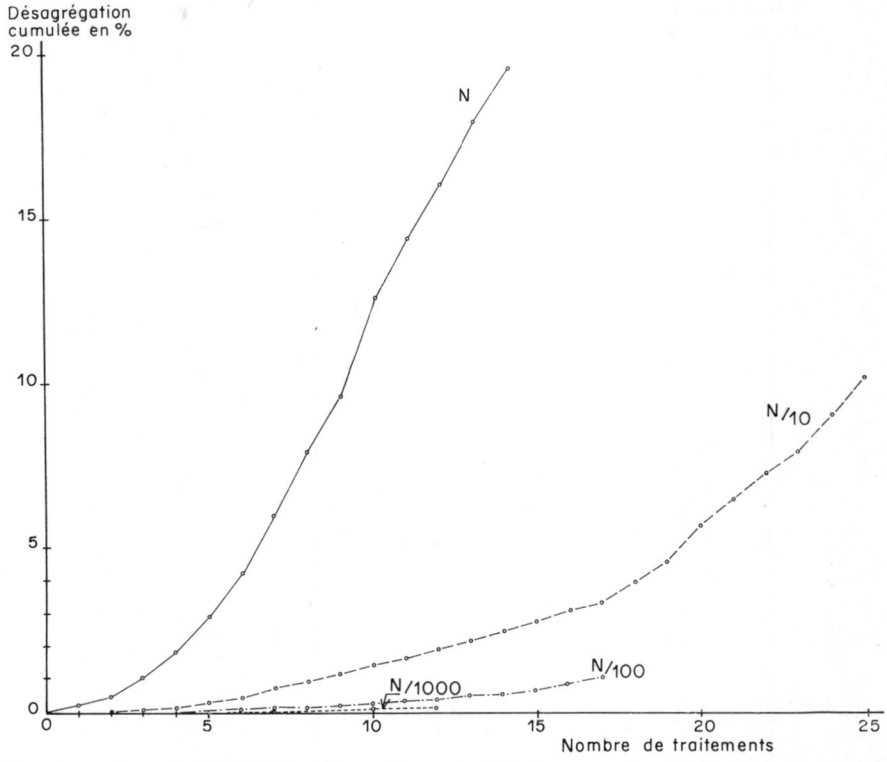



Fig. 5. — *Taux de désagrégation du granite en fonction du renouvellement des solutions de $MgCl_2$*

de courbes (fig. 5), nous avons représenté la désagrégation en fonction du renouvellement des solutions et dans un 2e type en fonction du $K_2O$ libéré (fig. 6 et 6 *bis*).

On s'aperçoit, si on compare la libération du $K_2O$ (donc, l'action chimique, fig. 2) et la désagrégation (action physique, fig. 5), que les deux phénomènes ne sont pas parallèles : le 1er est un phénomène linéaire au cours du temps, alors que le 2e présente l'aspect d'une courbe en S.

Mais, par contre, on peut aisément vérifier en considérant les figures 5 et 6 que la désagrégation est indépendante de la durée du traitement ; ainsi, des traitements provoquant la même sortie du potassium mais de durée très différente (ou en nombre très différent) donnent la même désagrégation. Le phénomène de désagrégation est donc bien directement lié à la sortie du potassium.

Or, on sait que cette extraction du potassium des micas se traduit par une expansion du minéral phylliteux. C'est ce gonflement qui est donc responsable de l'effet mécanique obtenu sur la roche.

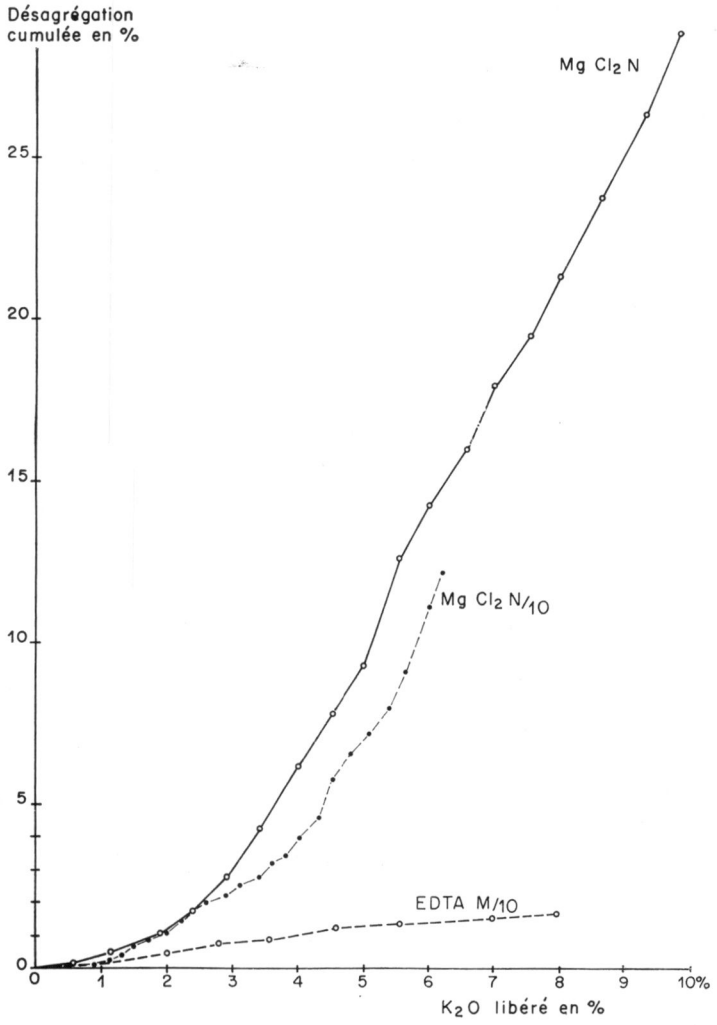



FIG. 6. — *Taux de désagrégation du granite en fonction du $K_2O$ libéré*

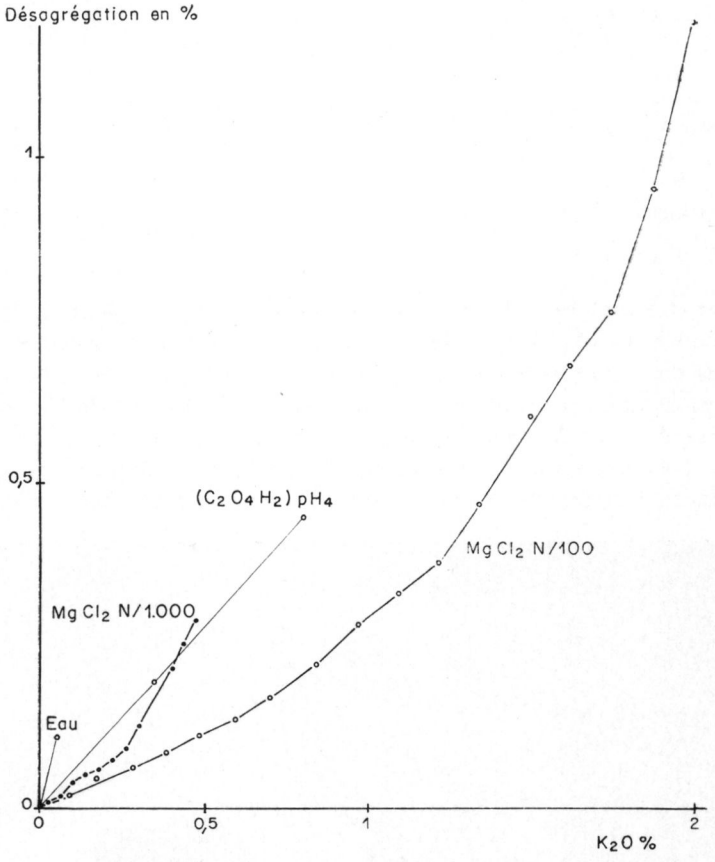



FIG. 6 *bis*. — *Taux de désagrégation du granite en fonction du $K_2O$ libéré* (à une échelle différente)

Des mesures de pressions de gonflement de différents minéraux argileux ont été réalisées récemment (BRIAND, 1969). Ces résultats indiqués dans le tableau 18 montrent que les pressions obtenues varient considérablement avec le cation interfoliaire.

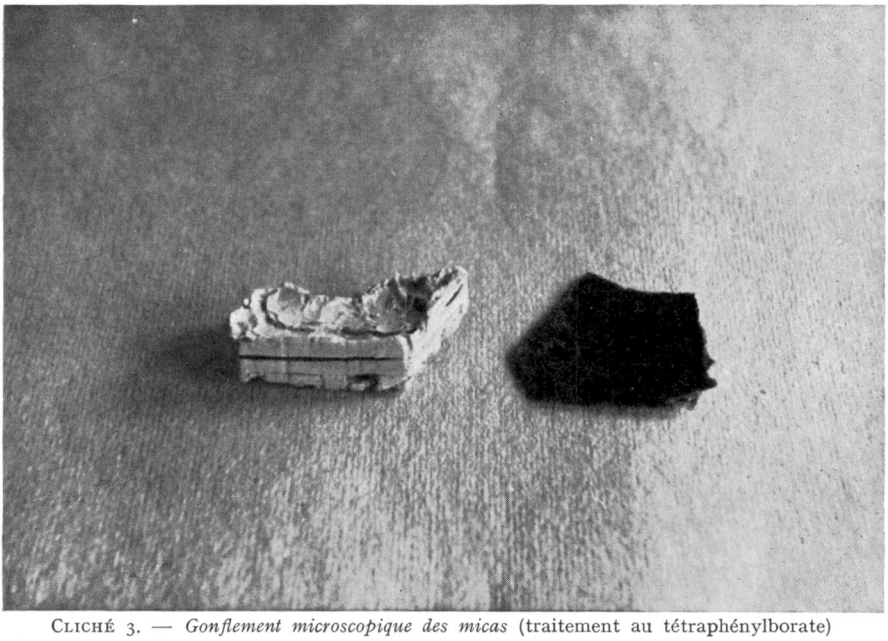
TABLEAU 18

*Pression de gonflement de différents minéraux gonflants*
(BRIAND, 1969)

| Minéral argileux | Cation interfoliaire | Pression de gonflement (en kg/cm²) |
|---|---|---|
| Montmorillonite | Ca | 120 |
| | Na | 70 |
| | K | 43 |
| Illite | K | 38 |
| Kaolinite | | # 20 |

Au fur et à mesure de l'extraction du potassium des micas, on aura apparition d'un minéral gonflant de type vermiculite caractérisé par la présence des ions Na ou Mg plus ou moins hydratés en positions interfoliaires. A l'échelle élémentaire, cette transformation se traduira par un passage de l'équidistance 001 du mica de 10Å à 12 Å ou 14 Å, donc par une augmentation de volume de 20 à 40 p. 100.

— Le gonflement qu'il est possible de mesurer au niveau des feuillets par l'intermédiaire des rayons X, se traduit d'ailleurs macroscopiquement par une



CLICHÉ 3. — *Gonflement microscopique des micas* (traitement au tétraphénylborate)

expansion qui, par suite des effets de distorsion, sera encore beaucoup plus considérable. Le cliché 3 représente ainsi un fragment de mica de 2 cm² de surface et d'une épaisseur voisine de 0,5 mm. A côté, figure un fragment de même dimension, après traitement au tétraphénylborate (l'épaisseur est voisine de 8 mm) ; le gonflement (épaisseur multipliée par 12) est donc spectaculaire.

— Des études réalisées au microscope polarisant sur des lames minces de granite permettraient également de mettre en évidence un écartement des feuillets (clichés 4 et 5). Il est donc normal que lorsqu'une telle évolution se manifeste au sein d'une roche micacée, l'effet mécanique engendré soit considérable.

## IV. — Rôle de la nature pétrographique de la roche

Toutes les expériences précédentes ont porté sur un granite à biotite (biotite 15 à 20 p. 100). Sans vouloir faire une étude systématique du comportement de toutes les roches, et afin de préciser à quels types de matériau un tel processus était applicable, nous avons répété ces essais sur quelques roches de nature très différente.

1° Dans un premier temps, nous avons tout d'abord retenu le test au cobaltinitrite de sodium qui paraît le plus efficace, et nous avons choisi, pour opérer, des matériaux appartenant à la famille du granite ou très proche de cette famille (tabl. 19).

— Étant donné l'importance que prend le mica (et en particulier le mica noir biotite), nous avons d'abord choisi des roches sans micas (aplites, granites à amphiboles) ou ne contenant que des micas blancs (granulite).

— Ensuite, nous avons retenu des roches à biotites, mais présentant des structures différentes (kersantite, protogine).

Les résultats sont rassemblés dans le tableau 19 : la désagrégation est fonction *grosso modo* de la quantité de biotite présente. Mais un facteur essentiel intervient

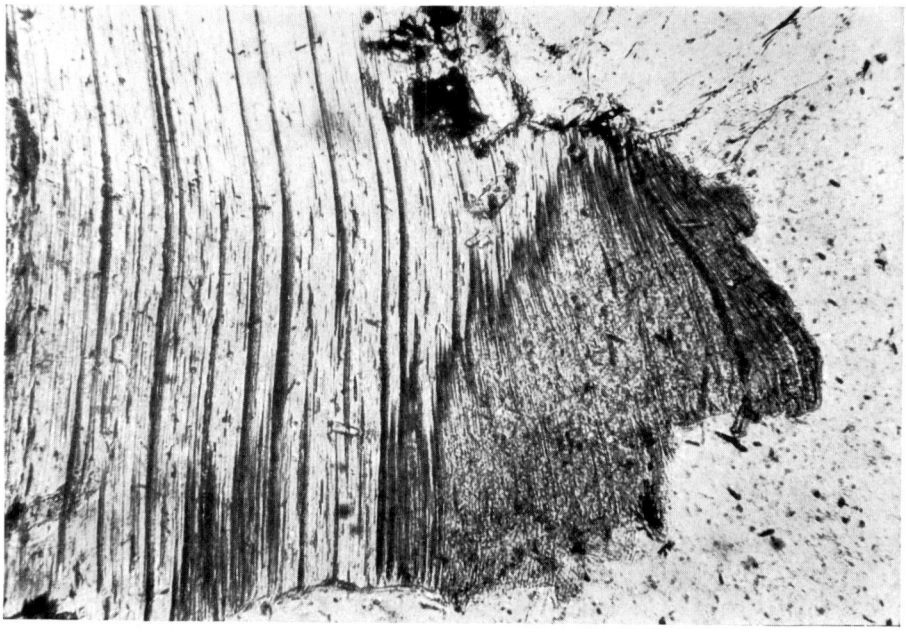
TABLEAU 19

*Test de désagrégation* (cobaltinitrite) *appliqué à des roches de la famille du granite*

| Roche | Massif | % et type de phyllite | Structure | Désagrégation |
|---|---|---|---|---|
| Aplite | Becons | Pas de biotite | Microgrenue | Nulle |
| Granite à amphiboles | Hohwald (Vosges) | Peu de biotite | Grenue | Faible |
| Granite à amphiboles | Ballon (Vosges) | Peu de biotite | Grenue à porphyroïde | Faible |
| Granulite | Alençon | Muscovite prépondérante | Grenue | Nulle |
| Kersantite | Logona | 24 % biotite | Microgrenue | Forte |
| Protogine | Mont-Blanc | Biotite abondante | Cataclastique | Forte |

cependant, c'est la structure de la roche : taille des minéraux, degré d'engrènement, importance des fractures.

CLICHÉ 4



CLICHÉ 5

CLICHÉS 4 et 5. — *Cristaux de biotite en voie de transformation lors du traitement du granite par* $Mg(NO_3)_2$ (Microscope polarisant 100 ×)

Ainsi, pour un pourcentage de biotite identique, le comportement peut être très distinct : une kersantite qui a une structure microgrenue très fine se désagrège par exemple beaucoup moins que la protogine qui, par sa structure cataclastique semble prédisposée à une forte désagrégation.

2° Nous avons dans une deuxième série d'essais appliqué le test utilisant une solution saline (500 cm³ $MgCl_2$ N à 80°C), qui se prête mieux à une mesure des effets chimiques, sur des roches d'origine très différente contenant en particulier des minéraux phylliteux non micacés (tabl. 20).

TABLEAU 20

*Test de désagrégation* (6 traitements par $MgCl_2$ N) *appliqué à différentes roches*

| Roche | Origine ou massif | Minéraux micacés | Désagrégation (%) |
|---|---|---|---|
| Leptynite | | Pas de micas | Nulle $\ll 0,1$ |
| Basalte | Massif central | | Faible $< 0,1$ |
| Diorite | San Gavino (Corse) | Faible | Faible (0,74) |
| Schiste | Autun | + Illite / Séricite | Faible (0,12) |
| Schiste ardoisier | Poligné (Bretagne) | + Illite / Séricite | Faible (0,26) |
| Micaschiste | Bersac (Haute-Vienne) | 20 % biotite | Importante $> 3$ |

Les courbes concernant la libération du potassium et la désagrégation ont été établies (fig. 7 et 7 *bis*). Elles montrent tout de suite que dans les roches sans micas (leptynite, basalte) l'évolution est nulle. Il en est de même dans les roches contenant l'équivalent argileux dioctaédrique des micas (schistes d'Autun).

La diorite montre une évolution sensible mais faible ; par contre, pour le micaschiste, l'évolution est très forte et comparable à celle d'un granite à biotite.

L'utilisation des 2 tests sur des roches très différentes permet donc d'une part, de caractériser les roches susceptibles de subir une évolution désagrégeante et d'autre part, de confirmer la condition nécessaire à ce type d'évolution, à savoir : la présence d'un mica trioctaédrique (du moins pour une évolution rapide).

Ainsi, ces expériences mettent donc nettement en évidence l'intervention de facteurs propres à la roche elle-même : c'est-à-dire la quantité de minéraux vulnérables, leur taille (grosseur du grain) et surtout leur mode de répartition à l'intérieur de la roche.

## V. — Rôle de la structure des édifices silicatés

L'étude expérimentale du comportement des roches que nous avons entreprise montre que les micas jouent un rôle déterminant dans ces processus de désagrégation. Toutefois, pour confirmer cette conclusion, des traitements ont été appliqués à des feldspaths ; nous avons ainsi étudié le comportement de deux cations compensateurs : le potassium et le calcium.

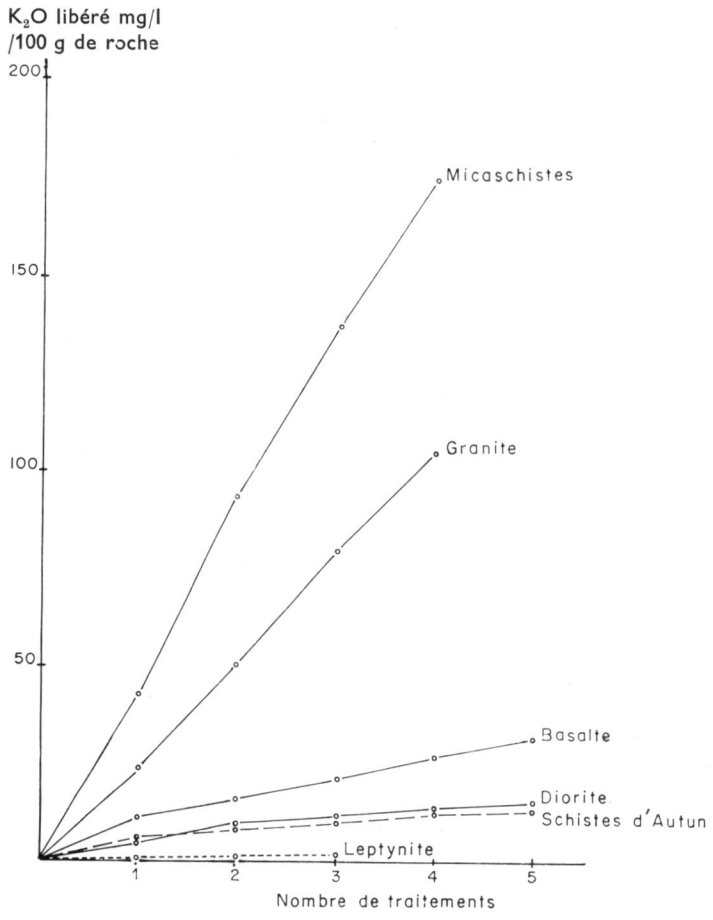



FIG. 7. — *Taux de libération de $K_2O$ suivant le type de roche* (test avec $MgCl_2$ N)

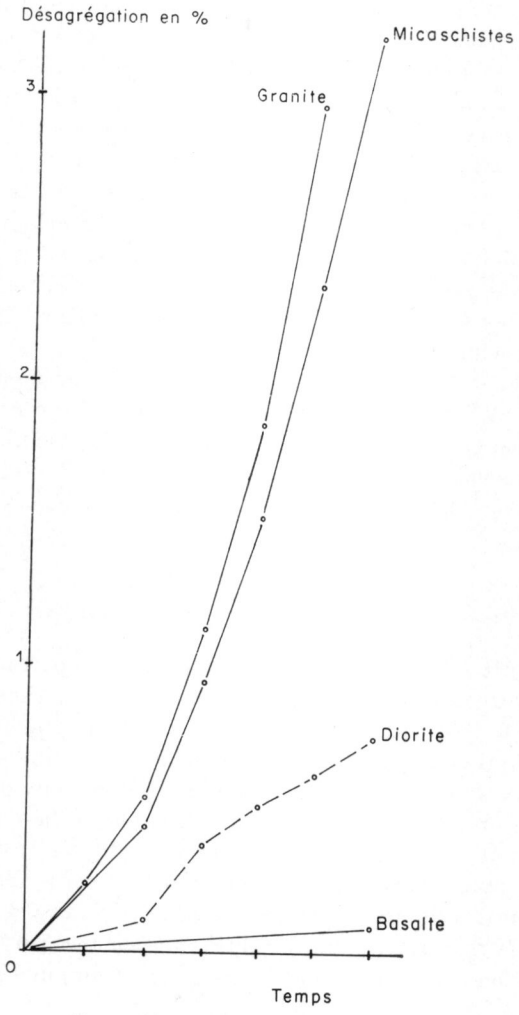



FIG. 7 *bis*. — *Désagrégation obtenue*

### 1. — *Expériences sur feldspath orthose*

Les expériences effectuées sur leptynite, roche ne contenant que du quartz et de l'orthose, nous ont déjà montré que le traitement par $MgCl_2$ N à chaud ne libère que des quantités de $K_2O$ très faibles, voisines de 0,5 mg $K_2O$ par litre (fig. 7).

Nous avons repris des essais similaires en appliquant un traitement au cobaltinitrite à des fragments ou des poudres d'orthose. On constate que la libération est quasi nulle. Par contre, il y a fixation du réactif à la surface du minéral. Nous retrouvons donc la notion de compétition entre le minéral et le réactif, que nous avons déjà définie précédemment : pour la biotite, il y a libération du potassium ; pour le feldspath, en revanche, la force de liaison à l'intérieur du réseau est plus forte que la force exercée par le réactif.

Il semble donc qu'il y ait une coupure nette dans les réactions des minéraux en ce qui concerne le potassium. Cette coupure est d'ailleurs justifiée par les différences fondamentales de structure : les micas sont des macrophyllites ayant une structure discontinue où, dans certaines conditions, un échange « forcé » peut être réalisé, alors que les feldspaths ont une structure continue tridimensionnelle, où l'échange est stéréochimiquement impossible.

Par contre, dans des minéraux à structure tridimensionnelle analogue, mais où la présence de larges canaux dans le réseau permet la libre circulation des cations, on observe des échanges possibles sans destruction de la structure, à la température ordinaire pour les zéolites, ou à des températures plus élevées pour des minéraux comme l'analcite $AlSi_2O_2Na$, $H_2O$ ou la leucite $AlSi_2O_2K$ (Barrier et Hinds, 1953 ; Debron, 1965).

### 2. — *Expériences sur plagioclases — Cas de l'extraction du calcium*

Afin de compléter la série d'extractions spécifiques portant sur les divers éléments constituant des roches, quelques expériences ont été menées sur le calcium, mais uniquement sur des minéraux à structure continue appartenant à la série des plagioclases. Les ions calcium occupent dans la structure une place similaire à celle des ions potassium dans les feldspaths alcalins. Néanmoins, un traitement à 80°C par une solution normale de $NH_4Cl$ ou de KCl s'est révélé capable de libérer par une réaction d'échange une partie du calcium. Cette réaction s'est produite non seulement sur des minéraux pulvérisés où l'on pourrait suspecter un effet de broyage, mais également sur des fragments de granite. On arrive ainsi à extraire 75 et 25 mg de CaO lors des deux premiers traitements, mais la réaction d'échange se bloque lors des autres renouvellements contrairement aux traitements $MgCl_2$ effectués sur micas (fig. 8).

On doit supposer que les phénomènes d'échange peuvent alors se produire avec les premières couches du minéral, mais que la progression de la réaction n'est plus possible vers l'intérieur (Marshall, 1964). En tout cas, cette libération de calcium n'a pas été suffisante pour provoquer les effets sensibles de désagrégation [1].

[1] Dans le cas de la diorite (fig. 7 *a* et *b*), la désagrégation est relativement plus importante que la libération de $K_2O$ ne le laisse supposer ; la libération de CaO pourrait donc peut-être intervenir.

On constate donc que des minéraux peuvent avoir des réactions très différentes vis-à-vis des systèmes d'agression, réactions qui sont à relier directement à la structure.

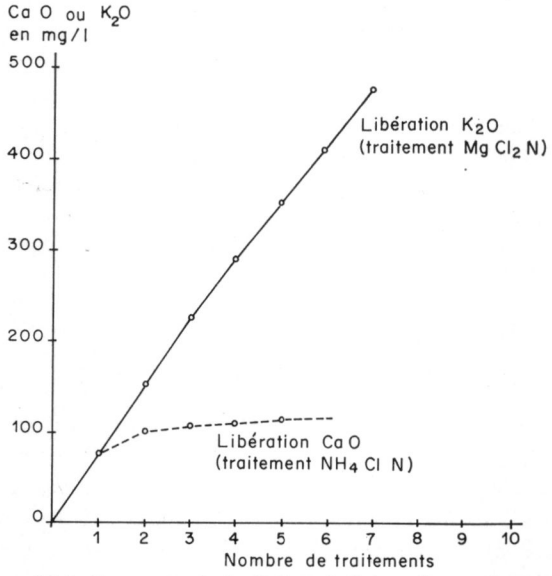



FIG. 8. — *Libération comparée de $K_2O$ et CaO pour le granite de Varennes*

L'opposition apparaît particulièrement nette pour le potassium, entre les minéraux à structure continue tridimensionnelle comme les feldspaths et les minéraux à structure phylliteuse.

Dans le premier cas, le potassium ne sera libéré qu'au cours de réactions entraînant la destruction complète du réseau (ex. : hydrolyse).

Dans le deuxième cas, des réactions d'échange sont possibles, soit avec des réactifs gravimétriques spécifiques du potassium, soit avec des solutions plus ou moins chargées en cations (Na, Ca, Mg).

Chaque fois qu'une telle réaction d'échange pourra se produire et aussi se poursuivre dans le milieu naturel, elle sera donc à l'origine d'un intense effet de désagrégation des roches granitiques.

## CONCLUSIONS SUR LA DÉSAGRÉGATION EXPÉRIMENTALE DU GRANITE

Les résultats les plus significatifs, qui découlent de cette première série d'expériences, se présentent de la façon suivante :

1° Pendant longtemps, on a opposé, pour expliquer l'évolution des roches à la surface du globe, des actions de type physique à des actions de type chimique en assignant à chacune d'elle des effets nettement différents : les premiers aboutissaient à une fragmentation des roches, tandis que les secondes étaient à l'origine de leur altération chimique.

En fait, nos expériences montrent que le problème est plus complexe et qu'il

faut plutôt, dans un certain nombre de cas, rapprocher les deux types de phénomènes au lieu de les opposer.

— Ainsi, une action chimique, ne serait-ce que la simple hydrolyse par l'eau peut provoquer un certain effet physique de désagrégation sur la roche, si par exemple le climat permet la cristallisation des sels libérés pendant une période de l'année.

— De même, un lessivage intense peut amener une certaine microdivision des cristallites et donc également un amenuisement de type physique.

— Dans le même ordre d'idées, il est probable que lors du phénomène de « salzsprengung », l'effet mécanique constaté n'est pas seulement à relier à l'action des pressions de cristallisation des sels, mais également à une action chimique des solutions de ces sels, sur les micas, qui se développerait pendant la période humide des essais.

2° Mais pour que l'évolution chimique soit efficace *sur le plan physique*, il importe avant tout qu'elle ne soit pas globale, mais qu'elle porte uniquement sur certains éléments du réseau, en particulier sur ceux qui jouent un rôle de liaison entre les entités structurales caractérisant certains édifices (les phyllosilicates par exemple).

Ainsi, en extrayant le potassium interfoliaire des constituants micacés, par l'action de solutions salines, sodiques ou magnésiennes, on provoque son remplacement par des ions plus hydratables et on assure en même temps une insertion d'une ou deux couches d'eau, ce qui entraîne une variation de volume de 20 à 40 p. 100 de l'épaisseur du feuillet. Cette expansion va alors exercer une contrainte importante à l'intérieur même de la roche et être ainsi à l'origine de l'effet de désagrégation constaté sur les granites.

3° Il est important de noter, en outre, que cette évolution expérimentale conduit à un matériau désagrégé qui a la même granulométrie que celle de l'arène développée sur le même granite dans les conditions naturelles (ROBERT, 1966).

En plus de l'effet de désagrégation, nous avons eu en même temps, d'une part, une augmentation de la porosité et de la capacité pour l'eau des fragments de granite en voie de désagrégation, et d'autre part, nous avons noté une production de particules fines à forte capacité d'échange consécutive à l'ouverture et à la microdivision des micas.

Ainsi, une partie au moins des étapes qui, d'une roche massive, peuvent conduire dans le milieu naturel à la formation d'un sol, a été mise en évidence au cours de ce travail.

L'évolution que nous avons étudiée par voie expérimentale constitue en définitive un exemple particulièrement net où une action chimique limitée portant sur les micas a pour conséquence un effet mécanique intense. Sans exclure pour autant que des actions chimiques de ce type affectant spécifiquement les feldspaths (STRUILLOU, 1969) ou d'autres minéraux puissent également amener la dislocation de la roche, il est incontestable que l'évolution des micas peut constituer un processus majeur de ce type de phénomène.

C'est ce qui nous conduira à aborder ultérieurement une étude expérimentale plus détaillée relative à l'évolution des micas et des édifices micacés.

*Reçu pour publication en août 1970.*

## SUMMARY

### EXPERIMENTAL STUDY OF GRANITE DISINTEGRATION (1)

This study concerns the first stages in the evolution of granitic rocks, often consisting of a simple disintegration of the mineral constituents.

It appears that, in this regard, the direct influence of physical factors has been overestimated and that certain limited chemical activities may well have a far greater disintegrating effect.

The same thing occurs as when potassium is extracted from trioctahedric micas : the vermiculate-forming evolution which is accompanied by a swelling of the minerals in the heart of the rock causes intense and rapid disintegration of the granite.

## ZUSAMMENFASSUNG

### EXPERIMENTALE UNTERSUCHUNG DES ZERFALLS DES GRANITES (2)

Diese Untersuchung bezieht sich auf die ersten Stufen der Evolution der granitischen Gesteine, die sich oft durch einen einfachen Zerfall der mineralischen Bestandteile anzeigen.

In dieser Beziehung scheint es, dass der direkte Einfluss der physikalischen Faktoren über schätzt wurde und dass gewisse begrenztz chemische Eingriffe imstande sind, viel grössere Zerfalls wirkungen auszuüben.

Dies ist der Fall beim Ausscheiden des Kaliums aus dem dreioktaedrischen Glimmer : diese « vermiculitisante » Evolution, die durch eine Aufschwellung im Innern des Gesteines begleitet ist, verursacht einen intensiven und raschen Zerfall der Granite.

## РЕЗЮМЕ

*Экспериментальное изучение распадение гранита*

М. РОБЕР.

Данное изучение касается первых стадий эволюции гранитических пород, состоящих иногда только из рассыпания составных минералов.

Представляется, что в этом случае, прямое вмешательство физических факторов было несколько переоцененно, и что некоторые ограниченные химические воздействия могут вызвать гораздо более сильные эффекты распадения.

Это наблюдается, например, при экстракции калия из триоктаэдрических слюд : эта « вермикулитизирующая » эволюция, сопровождающаяся набуханием минералов внутри породы, вызывает интенсивное и быстрое распадение гранитов.


* Выдержки из докторской диссертации представленной на Научном факультете Парижского Университета 21-го Мая 1970.

(1) Extract from a thesis for a state doctorate submitted at the Faculté des Sciences of the University, of Paris, 21st. May, 1970.

(2) Auszug aus einer These für den Staatsdoktortitel, die am 21. Mai 1970 bei der pariser Wissenschafts-Fakultät unterbreitet wurde.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BARRER R. M., HINDS L., 1953. Ion exchange in crystals of analcite and leucite. *J. chem. Soc.*, 1879-1888.

BIROT P., 1947. Résultats de quelques expériences sur la désagrégation des roches cristallines. *C. R. Acad. Sci.*, **225**, 745-747.

BLACKWELDER E., 1933. The insolation hypothesis of rock weathering. *Amer. J. Sci.*, **26**, 97-117.

BRIAND J., 1968. Pressions de gonflement des argiles. Mesure et signification. *C. R. 3e colloque de l'A. R. T. F. P.* (Pau, 1968), 577-613.

CAILLÈRE S., BIROT P., HÉNIN S., 1954. Étude expérimentale du mécanisme de la désagrégation de quelques roches éruptives et métamorphiques. *5e Conf. Intern. Sci. Sol*, Léopoldville, **2**, 18-22.

CHARLOT G., 1966. *L'analyse qualitative et les réactions en solution.* Masson, Paris.

COLLIER D., 1951. Contribution à l'étude de l'altération des granites. *Ass. Fr. Étude du Sol*, 23, 1-12.

COLLIER D., 1961. Mise au point sur les processus de l'altération des granites en pays tempérés. *Ann. agron.*, **12**, 273-331.

DEB B. C., 1950. Estimation of free iron oxides in soils and clays and their removal. *J. Soil Sci.*, **1**, 212-220.

DEBRON G., 1965. Contribution à l'étude des réactions d'échange des ions alcalins et alcalino-terreux dans les feldspathoïdes. *Bull. Soc. Franç. Min. Crist.*, 88, 69-96.

DEJOU J., 1967. L'altération des granites à 2 micas du Massif de la-Pierre-qui-Vire (Morvan). *Ann. agron.*, **18**, 145-201.

DEJOU J., PEDRO G., 1967. A propos des « arènes » dans les pays tempérés et de la présence de kaolinite au sein de la zone d'altération. *Bull. Ass. Fr. Étude du Sol*, **1**. 1-4.

DEMOLON A., BASTISSE E.-M., 1936. Genèse des colloïdes argileux dans l'altération du granite en case lysimétrique. *Ann. agron.*, **6**, 803-811.

DUFFAUT P., 1957. Sur la genèse des boules de certains granites. *C. R. Soc. Géol. Fr.*, **8**, 139.

ESKOLA P., 1930. On the desintegration of Rapakivi. *Bull. Comm. Geol. Finl.*, nº 92, 96-105.

GRIGGS D. T., 1936. The factor of fatigue in rock exfoliation. *J. Geol.*, **44**, 781-796.

HÉNIN S., PEDRO G., 1957. Mise en évidence d'un effet de dislocation du granite à biotite par traitement à l'eau oxygénée. *C. R. Acad. Sci.*, **245**, 1451-1453.

HÉNIN S., ROBERT M., 1964. Nouvelles observations sur le mécanisme de la désagrégation du granite. *C. R. Acad. Sci.*, **259**, 3577-3580.

HÉNIN S., PEDRO G., ROBERT M., 1968. Considérations sur les notions de stabilité et d'instabilité des minéraux en fonction des conditions du milieu ; essai de classification des systèmes d'agression. *9th Intern. Congr. of Soil Sci. Trans.*, Adelaïde, vol. III, pp. 9, 79-90.

MAMY J., 1969. Nouvelles données sur les cinétiques d'échange du potassium interfeuillet des phlogopites. *C. R. Acad. Sci.*, **269**, 1151-1154.

MARSHALL C. E., 1964. *The physical chemistry and mineralogy of soils*, vol. I : Soils materials. John Wiley and Sons Ed., New York, 388 p.

OBERLIN A., HÉNIN S., PEDRO G., 1958. Recherches sur l'altération expérimentale du granite par épuisement continu à l'eau. *C. R. Acad. Sci.*, **246**, 2006-2008.

PEDRO G., 1957. Nouvelles recherches sur l'influence des sels dans la désagrégation des roches. *C. R. Acad. Sci.*, **244**, 2822-2824.

PEDRO G., 1959. Considérations sur une forme de l'altération des roches : l'arénisation. *C. R. Acad. Sci.*, **248**, 993-996.

PEDRO G., 1960. Sur l'altération spontanée du granite en milieu naturel : résultats obtenus au bout de 30 ans dans l'expérience lysimétrique de Versailles. *C. R. Acad. Sci.*, **253**, 2242-2244.

PEDRO G., 1964. Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines. *Ann. agron.*, **2**, **3** et **4**, 344 p.

PEDRO G., 1966. Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles. *C. R. Acad. Sci.*, **262** D, 1828-1831.

POLYNOV B. B., 1937. *Cycle of weathering.* Murby Publ. co., Ed. London, 220 p.

ROBERT M., 1966. Le processus d'arénisation des granites : nouvelles données expérimentales. *Comptes rendus 91e Congrès*, Rennes, II, 153-161.

ROBERT M., 1966. Sur la nature des processus de désagrégation, d'arénisation et d'altération chimique ; études expérimentales. *C. R. Acad. Sci.*, **262**, 1519-1522.

SCOTT A. D., REED M. C., 1960. Chemical extraction of potassium from soils and micaceous minerals with solutions containing sodium tetraphenylboron : I. Preliminary experiments. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **26**, 191-194.

SEDDOH F. K., 1969. *Les granites du Massif de Luzy* (Morvan méridional), *Pétrographie, Altérations*. Thèse 3e cycle, Fac. Sci., Dijon, 138 p.

STRUILLOU R., 1969. Prévision de l'influence des produits d'altération contenus dans les matériaux rocheux sur leur stabilité mécanique dans le temps. *Int. Clay. Conf. Proc.*, Tokyo, vol. I, 805-816.

## ANNEXE I

### Caractéristiques du granite de Varennes

Il s'agit d'un granite à biotite à gros grain (granodiorite) recueilli dans la région de Theix ou Varennes (route de Boisséjour à Mauson, Puy-de-Dôme).

1. — *Composition chimique* (en p. 100 d'oxydes)

| $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $TiO_2$ | $Fe_2O_3$ | FeO | MgO | MnO | CaO | $Na_2O$ | $K_2O$ | Perte au feu | $P_2O_5$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 60,81 | 18,34 | 0,88 | 0,80 | 4,04 | 2,55 | 0,15 | 3,82 | 3,81 | 4,74 | 0,56 | 0,26 |

Densité : 2,73 ; Porosité ; 0,2 %.

2. — *Composition minéralogique*

| Analyse qualitative | Approche quantitative en % | |
|---|---|---|
| Minéraux présents | Au compteur par point | D'après les données de l'analyse du granite et de la biotite |
| Quartz | 14 | 12,7 |
| Biotite | 16 | 21,6 |
| Feldspaths : Orthose | 28 | 15,3 |
| Feldspaths : Plagioclase (oligoclase) | 42 | 49,7 |
| Feldspaths | 70 | 65 |
| (Apatite Zircon opaque) | | 0,40 |

## ANNEXE 2

### Description des méthodes utilisées

*Méthodes expérimentales*

Ces méthodes sont très simples puisqu'elles utilisent essentiellement des réactifs chimiques.

1. *Traitements par des solutions salines.*

Par 500 cm³ ou 1 litre de solution à 80°C à la concentration indiquée dans le texte — en ballon de verre avec tube vertical pour le granite (cf. cliché 2).

2. *Traitements par des réactifs précipitants.*

Nous ne détaillerons que les 2 réactifs employés pour le potassium.

a) *Cobaltinitrite de Na* $[Co(NO_2)_6]Na_3$.

— Préparation du réactif :

1° Une fiole de 500 cm³ ; 180 g $NaNO_2$ dans l'eau distillée.

2° Une fiole de 500 cm³ contenant 28,60 g $CoNO_3$ + 50 cm³ $CH_3COOH$ cristallisable dans l'eau distillée ; le mélange 1/1 en volume doit se faire la veille de l'emploi pour permettre le dégagement de $NO_2$ et éventuellement la précipitation du K présent dans les réactifs.

— Emploi à l'abri de la lumière après filtration. Théoriquement 10 cm³ de réactif peuvent précipiter 0,02 g de $K_2O$ sous forme de sels isomorphes de K et Na. Mais, dans toutes les expériences, le réactif était ajouté en excès par rapport au $K_2O$ total présent dans le granite ou le mica en expérience ; durée du test 4 jours à $t \neq 20°C$.

— Destruction du précipité de potassium formé après fixation du réactif ; le précipité au contact du granite ou du mica est détruit par 2 traitements successifs de 15 minutes par NaCl N à une température voisine de 100°C — dosage du potassium en milieu NaCl N au photomètre de flamme.

b) *Tétraphénylborate de sodium.*

— Les traitements ont été effectués selon les techniques mises au point par Scott *et al.* (1960-1962) ; traitements en milieu NaCl en évitant l'emploi de l'EDTA préconisé par les auteurs.

Pour 5 g de mica, utilisation de 250 cm³ de solution à chaque traitement (3 g de tétraphénylborate + 14 g NaCl).

Durée : 4 jours à $t \neq 20°C$.

— Destruction du précipité et dosage — dissolution en milieu acétone en présence de NaCl (pour éviter la refixation du potassium).

Dosage au photomètre de flamme en milieu NaCl après évaporation de l'acétone.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (6), 819-844.

NOTE TECHNIQUE

# APPLICATION DE LA TECHNIQUE DE STANFORD ET DE MENT A L'EXTRACTION DU POTASSIUM DES SOLS

J. QUÉMÉNER et D. ROLLAND

*Station agronomique,*
*Société commerciale des Potasses d'Alsace, 68 - Aspach-le-Bas*
*Institut technique de Pratique agricole,*
*16, boulevard Sébastopol, 75-Paris (4e)*

## RÉSUMÉ

Les auteurs proposent une adaptation de la technique de Stanford et De Ment, basée sur l'accroissement de la durée de contact plante-sol portée à 20 jours, et sur l'utilisation de sol dilué par 3 fois son poids de sable (50 g de sol par pot), qui, dans les conditions d'environnement utilisées, permet d'extraire jusqu'à 1 000 p.p.m. de K. Mais dans ces conditions, la matière végétale produite n'est plus tout à fait indépendante de la richesse du substrat, sur lequel une deuxième extraction peut être effectuée, en apportant un nouveau lot de plantes carencées.

La dispersion des résultats semble dépendre du type de sol, de même que la reproductibilité d'une série à l'autre, qui paraît également liée au lot de semences utilisées.

Le potassium des engrais d'apport récent est absorbé facilement et la méthode permet l'étude de l'évolution des engrais, en particulier en fonction du temps, dans les divers types de sols.

Les auteurs suggèrent de nouvelles améliorations à étudier, notamment celle du rythme d'alimentation hydrique.

## INTRODUCTION

Très nombreux sont les travaux qui, pour estimer la valeur d'une méthode nouvelle d'appréciation des disponibilités potassiques des sols, se réfèrent, plus souvent qu'à une expérimentation de plein champ, à des extractions de potassium effectuées par des cultures en vases de végétation (voir entre autres, ARNOLD et CLOSE, 1961 ; FEIGENBAUM et HAGIN, 1967 ; SALMON, 1965 ; SCHULTE et COREY, 1965 ; TALIBUDEEN et DEY, 1968 ; CONYERS et MAC LEAN, 1969).

Le mode de réalisation de ces cultures varie avec les auteurs, et parfois pour un même auteur, dans le temps (SCHULTE et COREY, 1965).

D'autre part, à la Station d'Aspach-le-Bas, les résultats obtenus en vases de

végétation ont paru à l'origine pouvoir constituer un outil permettant de résoudre certains des problèmes posés dans la pratique ; cette conception a été à l'origine d'une évolution progressive des techniques utilisées : les vases de végétation de taille habituelle (c'est-à-dire contenant de 5 à 15 kg de terre), bien qu'ils aient permis d'obtenir des résultats essentiels (AUDIDIER *et al.*, 1962) étaient trop encombrants dans le temps et dans l'espace. L'adoption de vases de culture identiques à ceux utilisés par CHAMINADE (1960) a constitué un premier progrès. Mais, pour bien des sols, 5 à 7 coupes d'une culture de graminée fourragère, généralement de ray-grass anglais, étaient nécessaires pour entamer les réserves, et quel que fût l'intérêt des résultats obtenus (GARAUDEAUX et QUÉMÉNER, 1968), cette technique a été jugée d'exécution trop longue (et de ce fait plus difficile à réaliser en conditions standardisées), et parfois aléatoire (détérioration progressive de la structure au cours de la culture en récipients de petites dimensions, le phénomène étant plus ou moins accentué selon les sols). De plus, les quantités de terre nécessaires, bien que réduites par rapport au procédé antérieur, rendaient obligatoire un échantillonnage particulier.

Vers 1961, la technique de STANFORD et DE MENT a été introduite à la Station d'Aspach, pour des études d'engrais phosphatés. La remarque faite par les auteurs (DE MENT *et al.*, 1959) que la technique pouvait aussi bien s'appliquer à l'étude de la fertilité naturelle des sols, la courte durée de son exécution, qui suggérait une plus grande facilité de standardisation, le caractère quasi invariant de la production de matière sèche dans ce type de culture, permettant *l'application à tous les sols d'une sorte de réactif végétal préparé à l'avance et pouvant être considéré comme constant* les faibles quantités de terre nécessaires, nous ont incités à essayer d'adapter cette technique à l'extraction du potassium des sols. Les premiers essais ont rapidement abouti à un mode opératoire qui n'a que peu varié depuis, et ont permis la rédaction d'un mémoire qui n'eut qu'une diffusion très restreinte (ROLLAND, 1962). Aussi, avons-nous jugé utile de le reprendre en l'étoffant des résultats généraux obtenus depuis, des critiques que l'on peut faire à la technique et des performances dont elle est susceptible.

## I. — OBJECTIFS

Nous avons cherché à mettre au point une technique permettant, avec le maximum de commodité, c'est-à-dire avec le minimum d'encombrement dans l'espace et dans le temps, de « sonder » les réserves en potassium d'un sol. Nous avons, dès le départ, abandonné l'idée de la culture d'épuisement total, c'est-à-dire celle de la culture qui s'arrête parce qu'elle ne trouve plus à s'alimenter.

Cette notion d'épuisement est parfois contingente, et il arrive que des sols sur lesquels la plante a péri d'inanition, se révèlent, après un nouveau conditionnement, aptes à alimenter une deuxième culture. En fait, quels que soient les facteurs que l'on puisse faire intervenir pour augmenter l'importance et la rapidité des prélèvements opérés par une plante sur un sol en culture en vase de végétation, l'obtention d'un épuisement complet ne paraît aisée que pour les sols ne renfermant que des réserves peu importantes ou très lentement mobilisables. A partir d'une certaine abondance des réserves, la recherche de l'épuisement complet peut conduire à une modification profonde de la nature des sols étudiés, par suite de l'accumulation de

déchets correspondant aux apports d'éléments nutritifs nécessaires aux plantes pour poursuivre l'extraction. En outre, arriver à l'épuisement complet peut ne présenter que peu d'intérêt pratique pour les sols dont la mobilisation des réserves est lente, et s'effectue avec un débit très régulier, mais trop faible pour alimenter des cultures à croissance rapide.

L'élaboration de cette technique de « sondage » des réserves s'est faite en étudiant l'influence de différents facteurs sur l'extraction du potassium de sols déjà connus comme très différents les uns des autres, puis en appliquant le mode opératoire résultant de ces quelques essais à un échantillonnage très divers. Comme le critère de fertilité est encore le potassium échangeable (par l'acétate d'ammonium normal et neutre), nous avons estimé au départ que pour pouvoir différencier de façon utile les réserves de potassium de ces sols, la technique à retenir devrait extraire, sur cet ensemble de sols, en moyenne au moins le potassium échangeable. Les écarts individuels par rapport à cette moyenne, l'incidence du prélèvement de potassium par les plantes sur le stock de potassium échangeable lui-même (ou, si l'on préfère, le renouvellement de ce K échangeable au cours de l'extraction) devraient constituer le supplément d'information dû à la culture, par rapport aux analyses courantes.

## II. — ÉTUDES PRÉLIMINAIRES

Le matériel utilisé est le même que pour nos essais d'engrais phosphatés (QUÉMENER, 1968). La plante est également l'orge, pour la même raison (homogénéité). La technique de culture est, au départ, identique. La mise au point a porté sur : la composition de la solution nutritive carencée, la durée de la phase carencée préalable, la durée du contact plante/sol, en liaison avec la quantité de terre, diluée ou non par du sable, et sur l'apport de solution nutritive pendant la phase d'extraction proprement dite.

### 2. 1. — *Recherche d'une solution nutritive appropriée*

Le remplacement du potassium par un ou plusieurs cations dans la solution nutritive carencée, pour neutraliser les anions $NO_3^-$, $PO_4^{---}$ et $SO_4^{--}$, peut se faire de plusieurs façons ; il est rendu un peu délicat par le fait que l'orge est une plante à sodium et qu'elle tolère mal $NH_4^+$.

Après quelques essais préliminaires, 3 solutions nutritives ont été comparées. Pour un apport initial de 50 ml, ces solutions fournissent 15 mg d'N, 10 mg de P et 8 de S. Des apports de 20 ml (10 + 10 dans le cas de la solution B) sont faits tous les deux jours à partir du 4e jour après la levée :

— Solution A (par litre) :

| | |
|---|---|
| Nitrate de chaux hydraté | 2 635 mg |
| Phosphate monoammonique | 742 mg |
| Sulfate de magnésie | 1 280 mg |
| — de manganèse | 20 mg |
| — de fer | 20 mg |
| Acétate de zinc | 20 mg |
| Borax | 1 mg |

— Solution B : obtenue par mélange de volumes égaux :

| | | |
|---|---|---|
| $B_1$ : | Phosphate disodique | 4 650 mg/l |
| $B_2$ : | Nitrate de chaux hydraté | 5 270 mg |
| | $SO_4Mg + H_2O$ | 2 560 mg |
| | $SO_4Fe$ | 40 mg |
| | $SO_4Mn$ | 40 mg |
| | Acétate de zinc | 40 mg |
| | Borax | 2 mg pour un litre |

Le pH du mélange, où du phosphate bicalcique précipité, est de 6,7. Ce mélange est effectué au sein même du pot de culture.

— Solution C (par litre) :

Nitrate de soude 1 821 mg
Phosphate disodique 2 325 mg
Sulfate de magnésie et oligo-éléments comme A
pH = 8.

L'essai effectué avec terre d'Aspach comportait pour chacune des solutions : un témoin au transfert (à 15 jours), un témoin terre et 100 mg de $K_2O$ par pot sous forme de chlorure, tous récoltés après une semaine de contact.

*Résultats* : (en mg de K par pot pour les plantules totales, tiges et racines).

| | Témoin au transfert | $K_0$ | $K_{100}$ |
|---|---|---|---|
| Solution A ..... | 6,09 | 11,11 | 22,96 |
| Solution B ..... | 5,99 | 11,88 | 24,60 |
| Solution C ..... | 5,95 | 10,21 | 15,45 |

Statistiquement, nous avons les caractéristiques suivantes :

| | Plus petites différences significatives | | Coefficient de variation |
|---|---|---|---|
| | P 0,05 | P 0,01 | |
| Solution A ..... | 2,11 | 2,98 | 9,08 |
| Solution B ..... | 1,24 | 1,74 | 4,71 |
| Solution C ..... | 1,89 | 1,89 | 7,90 |

C'est avec la solution A que les signes de carence étaient les plus nets, et l'aspect des plantes était le plus sain avec la solution C.

Il est évident que c'est la solution B qui donne les meilleurs résultats. L'utilisation presque exclusive de sodium comme cation dans la solution C donne des plantes

très riches en cet élément (4 à 5 p. 100) et dont l'aptitude à absorber ultérieurement du potassium paraît fortement diminuée.

Pour tous les essais réalisés depuis, nous avons adopté la solution B, qui nous a donné des résultats satisfaisants. Il est toutefois peu probable qu'elle constitue un optimum, et en particulier, elle peut paraître trop riche en phosphates, mais ceux-ci sont mal absorbés par la plante à ce stade de végétation (QUÉMÉNER, 1968).

La figure 1 montre que, comme pour $P_2O_5$ (QUÉMÉNER, 1968), la répartition de la potasse entre parties aériennes et racines permet de se dispenser de la fastidieuse (et parfois inexacte) récolte des racines.

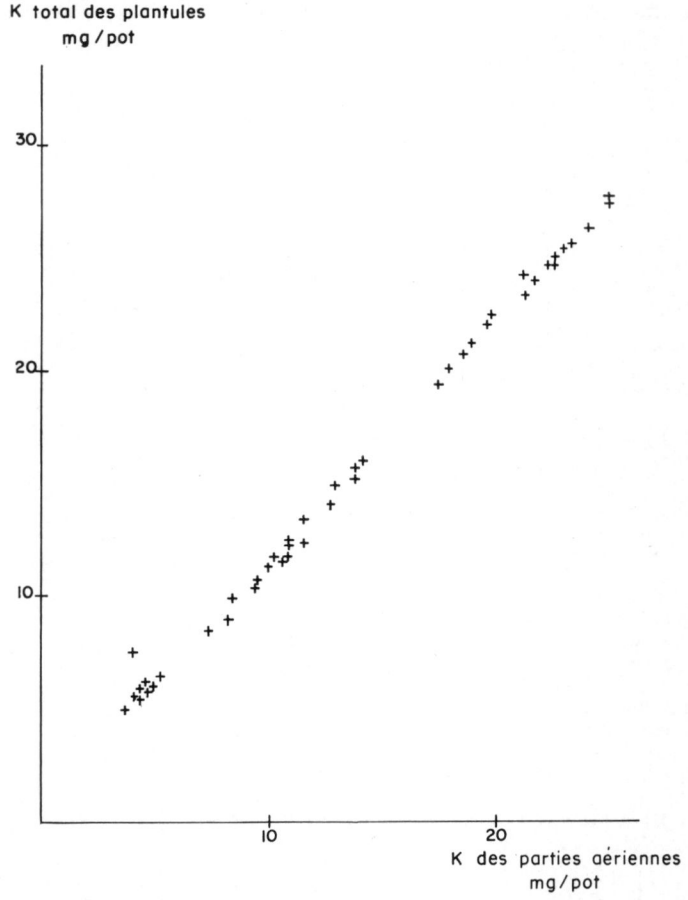



FIG. 1. — *Correspondance entre K des parties aériennes et K total de plantule*

Dans cet essai, nous avons à peu près : K total des plantules = 1,04 × K des parties aériennes + 1,2 (en mg pour un pot).

### 2. 2. — *Quantité de terre et durée de l'extraction*

L'application de la technique précédente dans les mêmes conditions que pour les essais d'acide phosphorique (QUÉMÉNER, 1968), à des sols divers, sans apports de sels de potassium, donne lieu à des absorptions de potassium par l'orge relative-

ment faibles, ne dépassant guère 20 p. 100 du potassium échangeable des sols considérés. Cette façon de faire mériterait sans doute d'être étudiée plus en détail, en parallèle avec des techniques d'étude des équilibres sol/solution, comme celle de BECKETT (1964), c'est-à-dire des mesures « d'intensité » plutôt que de stock, ce que nous avons indiqué à propos des phosphates (QUEMENER, 1968). Nous ne nous sommes pas jusqu'à présent engagés dans cette voie, qui ne correspond pas aux objectifs définis dans le paragraphe 1.

La recherche d'une amélioration de l'épuisement a conduit à augmenter la durée du contact jusqu'à 3 semaines, tout en essayant de diminuer la quantité de terre utilisée (de 200 g à 50 g). L'essai a été réalisé avec quatre sols dont les caractéristiques sont indiquées dans le tableau 1. Les conditions d'expérimentation étaient

TABLEAU I

*Caractéristiques des divers sols cités*

| | pH | C. E. C. (méq. / 100 g) | $CO_3Ca$ (‰) | N (‰) | K éch. (p.p.m) | Argile (‰) | Nature des argiles |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Aspach (68) * ..... | 6,0 | 14,0 | 0 | | 85 | 153 | Ill. (3) M (2) Chl. V 40 |
| La Malmare (72) ..... | 7,4 | 12,5 | 0 | | 59 | 110 | Illite-Montmorillonite |
| Saint-Jean-du-Cardonnay (76) ..... | 7,3 | 9,5 | 0 | | 52 | 113 | Chlorite |
| Champfleury (10) ..... | 8,0 | 18,5 | 660 | | 74 | 159 | Non déterminée |
| Guewenheim (68) ..... | 8,1 | n. d. | 150 | 2,13 | 138 | 229 | I (4) + K (2) + compl. gonflant (4) |
| Beaucouzé (49) ..... | 6,3 | 9,5 | 0 | 1,45 | 128 | 125 | I (7) K (3) |
| Manosque (04) ..... | 7,9 | 21,0 | 270 | | 254 | 259 | I (6) M (3) K (1) |
| Boulbène de Sainte-Marthe (47)..... | 5,1 | 8,5 | 0 | 0,90 | 50 | 138 | Non déterminée |
| Arène granitique (66) ... | 7,3 | 6,0 | 0 | 0,55 | 40 | 35 | — |
| Terrefort d'Avignonet (31) | 8,4 | 23,0 | 178 | 1,0 | 140 | 339 | — |
| « Crayot » du Barrois (10) | 8,0 | 28,0 | 35 | 1,85 | 200 | 419 | — |
| « Limon de vallée » du Barrois (10) ..... | 8,4 | 13,0 | 780 | 1,75 | 183 | 243 | -- |
| « Woëvre » du Barrois (10) | 8,5 | 15,5 | 110 | 1,0 | 108 | 358 | -- |
| Terrefort de Levignac (47) | 7,6 | 18,0 | — | 1,05 | 158 | 253 | — |
| « Herbue » du Barrois (10) | 6,7 | 12,5 | — | 1,10 | 300 | 167 | — |
| Sableux alluvial (66) .... | 7,9 | 6,0 | — | 0,35 | 90 | 8 | — |
| Les Loges s/Drecey (50) . | 5,6 | 13,0 | 0 | 2,35 | 71 | 130 | — |
| Hotot-en-Auge (14) ..... | 7.3 | 28,0 | 36 | 4,95 | 235 | 258 | — |
| Le Pin-au-Haras (61) : | | | | | | | |
| Pièce 1 ..... | 6,0 | 23,0 | — | 3,75 | 163 | 115 | — |
| Pièce 2 ..... | 6,8 | 26,0 | — | 4,45 | 321 | 193 | -- |
| Saint-Martin-d'Osmonville (76) ..... | 6,4 | 21,0 | 0 | 3,2 | 223 | 140 | — |

* ( ) nos des départements.

assez mauvaises (serre chauffée, en hiver, sans éclairage d'appoint). Le tableau 2 en indique les résultats. Les absorptions, calculées par différence entre les quantités de K présentes dans les parties aériennes des plantules ayant végété au contact

des sols et celles d'un témoin récolté au moment du transfert, sont exprimées, dans ce tableau, en p. 100 du K échangeable des sols. Aucun apport de solution nutritive n'a été fait après le transfert. Les absorptions ont augmenté d'une façon générale jusqu'à la 2e semaine. L'effet de la 3e semaine varie avec les sols et la quantité de

TABLEAU 2

*Influence du temps de contact et de la quantité de terre*

| | K échang. (p.p.m.) | Quantité de terre (en g) | Absorption (1) au bout de : | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 semaine | 2 semaines | 3 semaines |
| Aspach | 85 | 200 | 22,0 | 70,4 | 75,1 |
| | | 50 | 24,2 | 71,5 | 81,4 |
| Champagne | 74 | 200 | 7,8 | 32,8 | 37,4 |
| | | 50 | 5,1 | 27,5 | 54,0 |
| La Malmare $K_0$ | 59 | 200 | 21,2 | 50,7 | 49,1 |
| | | 50 | 13,8 | 44,5 | 25,7 |
| Saint-Jean du Cardonnay | 52 | 200 | 14,0 | 44,5 | 83,5 |
| | | 50 | 1,5 | 41,5 | 30,0 |

(1) Exprimée en % de K échangeable.

terre utilisée. La diminution de l'absorption qu'elle provoque pour deux des sols correspond à une détérioration de la végétation en fin d'essai. La diminution de la quantité de terre n'a augmenté que dans un cas (et à la fin seulement), celui du sol de Champagne, l'absorption relative. Elle l'a diminuée fortement dans deux cas sur quatre ; ceci peut provenir d'une diminution à la fois du volume radiculaire et de la quantité des éléments autres que K susceptibles de participer à l'alimentation des plantes après transfert.

Dans un deuxième essai, on a cherché à moins influencer le développement radiculaire, en diluant les 50 g de sol par 150 g de sable. Dans le même essai, a été étudiée l'influence de la durée de la culture carencée : étant donné le développement rapide du feutrage radiculaire, peut-être n'était-il pas nécessaire d'attendre le 15e jour après la levée pour procéder à la mise en contact des plantes et des sols. Il paraissait possible de ramener la date du transfert au 10e jour après la levée ; plus tôt, l'opération était plus délicate, le feutrage radiculaire n'étant pas assez développé pour maintenir l'ensemble sable + plantules.

Le tableau 3 contient les résultats de cet essai, réalisé dans de bonnes conditions, dans la serre, au printemps. Les calculs ont été effectués comme précédemment. Les chiffres obtenus sont en faveur du transfert à 10 jours. L'épuisement du sol est plus important et se poursuit plus régulièrement avec 50 g de terre (diluée par 150 g de sable) qu'avec 200 g. Le gain d'épuisement entre 11 et 19 ou 23 jours n'est

d'ailleurs pas très important, mais il s'agissait là de sols à K échangeable très faible. D'autre part, l'alimentation des plantes en autres éléments que K pouvait être insuffisante après le transfert.

TABLEAU 3

*Influence de la durée de la culture carencée et de la quantité de terre sur l'absorption de potassium* (en % du potassium échangeable au départ)

| Terre | Durée de la période de carence | Quantité de terre en g | Durée de la période de contact | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 11 jours | 15 jours | 19 jours | 23 jours |
| Aspach | 10 jours | 200 | 71 | 76 | 71 | 91 |
| | | 50 + 150 sable | 102 | 117 | 125 | 136 |
| Aspach | 14 jours | 200 | 70 | 66 | 65 | 68 |
| | | 50 + 150 sable | 79 | 83 | 114 | 98 |
| La Malmare | 10 jours | 200 | 33 | 19 | 30 | |
| | | 50 + 150 sable | 34 | 37 | 53 | |
| La Malmare | 14 jours | 200 | 18 | 7 | 20 | |
| | | 50 + 150 sable | 46 | < 0 | 2 | |

## 2. 3. — *Alimentation des plantes pendant la phase de contact sol-plantes*

Dans un premier essai, nous avons effectué des apports de solutions nutritives $B_1$ et $B_2$ (10 ml de chaque), uniquement pendant la semaine suivant le transfert, (les 2e, 4e, 6e et 8e jours après le transfert), avec l'idée que l'apport d'éléments nutritifs était utile surtout pendant la phase d'implantation des racines dans le sol, c'est-à-dire immédiatement après le transfert. Le tableau 4 indique les résultats obtenus dans cet essai, effectué avec 50 g de terre diluée par 150 g de sable. Le tableau 4 montre que cette façon de faire n'a pas été bénéfique.

TABLEAU 4

*Effet d'un apport de solution nutritive aussitôt après transfert sur l'absorption de potassium* (en % du potassium échangeable au départ)

| Terre | Durée de la période de contact | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 11 jours | | 15 jours | | 19 jours | | 23 jours | |
| | Solution avec | sans | Solution avec | sans | Solution avec | sans | Solution avec | sans |
| Aspach | 102 | 102 | 86 | 117 | 105 | 125 | 140 | 136 |
| La Malmare $K_0$ | 77 | 34 | 42 | 37 | 21 | 53 | | |

Un deuxième essai a été effectué en réalisant des apports de solutions $B_1$ et $B_2$ (10 ml de chaque) de façon aussi régulière que possible, pendant la période d'extraction, les 1er, 3e, 5e, 7e, 11e, 13e, 15e et 17e jours après le transfert.

Les résultats obtenus pour les deux sols déjà utilisés sont les suivants (en p. 100 de K échangeable initial) :

| | Contact de 10 jours | 20 jours |
|---|---|---|
| Aspach | 38 | 116 |
| La Malmare | 52 | 119 |

Ces résultats sont, au 10e jour, pour les deux sols, et surtout Aspach, bien au-dessous des précédents. Ceci peut tenir à des conditions d'environnement moins bonnes, dont l'effet se sera fait sentir surtout au début. A 20 jours, les résultats restent encore un peu inférieurs au précédent, pour Aspach ; ils sont, par contre bien supérieurs pour La Malmare, dont nous sommes arrivés pour la première fois à extraire une quantité de potassium supérieure au K échangeable.

### 2. 4. — *Application à la différenciation d'un lot de terres très diverses*

Le mode opératoire défini au paragraphe 22 a été appliqué à un lot de terres diverses (29 au total), qui n'avaient d'ailleurs d'autre intérêt, pour beaucoup d'entre elles, que d'être disponibles à la Station. Les résultats obtenus au bout de 10 jours et de 20 jours sont indiqués par les figures 2 et 3. Il ressort clairement de la figure 2

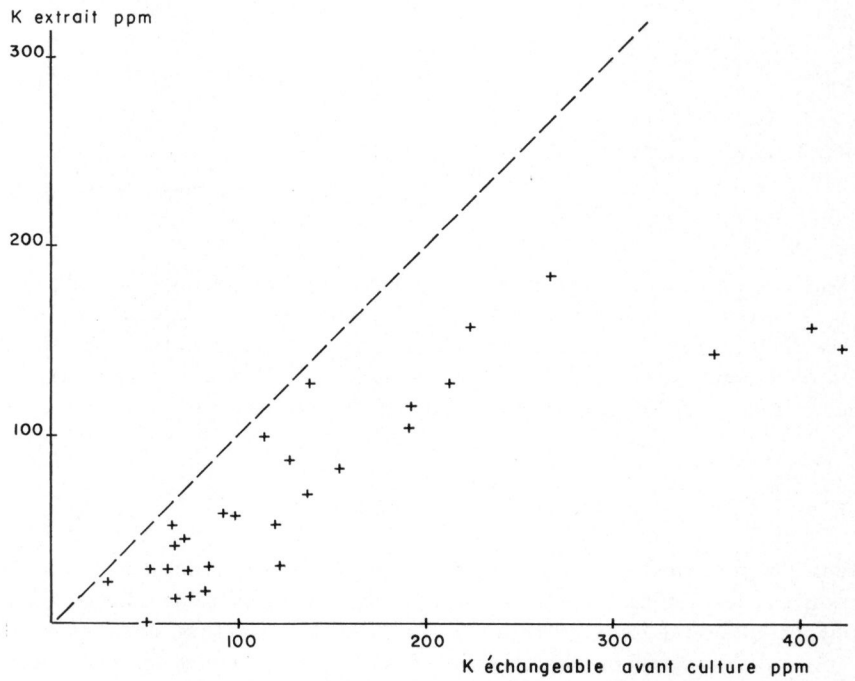



FIG. 2. — *K extrait en 10 jours d'un ensemble de sols divers*

qu'en arrêtant l'extraction au bout de 10 jours, il n'y a pratiquement aucune différenciation des sols à K échangeable supérieur à 200 p.p.m. Pour cette valeur, à ce stade, les plantes semblent donc saturées. Au bout de 20 jours au contraire, il apparaît parmi ces sols une différenciation. La saturation précédente a disparu. Pour cette durée de contact, il y a une nette liaison entre K échangeable et K absorbé, à laquelle échappent en plus ou en moins quelques échantillons.

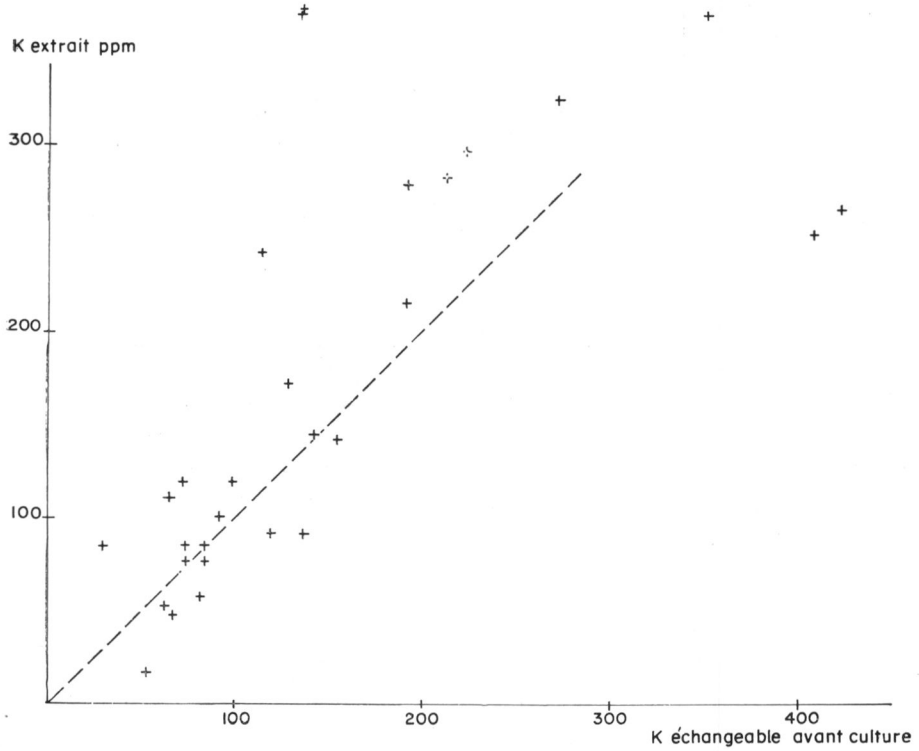



FIG. 3. — *K extrait en 20 jours d'un ensemble de sols divers*

Dans cet essai, le rapport K extrait en 20 jours/K échangeable initial varie de 0,33 à 2,91, avec une moyenne de 1,23. Pour dix sols, ce rapport est inférieur à 1 ; il se place entre 1 et 1,40 pour 12 d'entre eux et dépasse 1,40 pour les 7 derniers.

On peut donc estimer que l'objectif proposé — extraire en moyenne au moins K échangeable — a été atteint avec ce mode opératoire.

## III. — STANDARDISATION

Pour pouvoir utiliser cette méthode de travail de façon fructueuse, il faut pouvoir comparer les résultats d'essais effectués à des dates différentes. Cette remarque pourrait s'appliquer à toute autre technique de culture en pots, mais ici la courte durée et le faible développement végétatif permettent d'envisager une exécution en milieu conditionné et d'espérer ainsi une reproductibilité satisfaisante.

A la station d'Aspach, l'effort de standardisation s'est porté essentiellement sur l'éclairage des cultures. L'utilisation d'un local à peu près isotherme d'un bout de l'année à l'autre a permis de limiter l'appareillage de contrôle de la température à une ventilation énergique évacuant les calories produites par les lampes pendant la période « jour », dès que la température dépasse 26° ; un dispositif de chauffage permet de maintenir la température à 20° pendant la période « nuit », tandis qu'un système de pulvérisation d'eau maintient l'humidité relative de l'air aux environs de 60 p. 100.

Ce n'est qu'après divers tâtonnements que nous sommes arrivés à un éclairage satisfaisant : c'est-à-dire donnant des résultats culturaux aussi voisins que possible de ceux obtenus dans les meilleures conditions (période de mai à septembre) dans notre hall de végétation.

Environ 10 000 lux sont nécessaires sur le dessus des pots au départ et sont obtenus grâce à l'utilisation de tubes fluorescents de 125 W « Lumière du jour », espacés de 10 cm d'axe en axe, et placés à 40 cm au-dessus des pots. Les espaces entre tubes sont partiellement occupés par des tôles minces d'aluminium, inclinées à 45° de manière à former réflecteur tout en laissant passer l'air. La nappe réalisée comporte 30 tubes, permettant d'éclairer environ 340 pots.

Dans ces conditions, à l'aplomb du milieu des tubes, on obtient 10 à 11 000 lux, mais 7 à 8 000 seulement aux extrémités, ceci pour des tubes neufs. Il est donc nécessaire, pour éviter des effets de position assez marqués, de déplacer quotidiennement les pots parallèlement aux lampes.

Au bout de 1 000 heures d'utilisation environ (soit, à raison de 15 heures par jour, 2 cultures complètes, chacune durant 34 jours), il est nécessaire de remplacer les lampes. En changeant un tube sur deux à la fin de chaque culture, nous obtenons un éclairage suffisamment reproductible d'un essai à l'autre.

La durée de « jour » fixée d'abord à 12 h a été portée à 15 h, ce qui permet de diminuer un peu l'étiolement qui apparaît au cours de la 5e semaine de culture, quand la lumière pénètre moins bien la masse végétale issue des pots serrés les uns contre les autres. Il est d'ailleurs nécessaire d'éloigner les lampes du support des pots de quelques cm à la fin de la 4e semaine de culture, quand les extrémités des feuilles viennent au contact des tubes.

Dans ces conditions, les résultats à 20 jours sont très voisins de ceux obtenus dans le hall de végétation de la station (tabl. 5). Par contre, l'extraction paraît être plus rapide au départ, en milieu conditionné, particulièrement pour le sol de Manosque.

L'objectif proposé au début de ce paragraphe paraissait donc atteint, et le mode opératoire complet peut à présent être défini.

## IV. — MODE OPÉRATOIRE ADOPTÉ

### 4. 1. — *Phase de culture carencée*

La préparation des cultures et les soins qu'on leur apporte pendant cette période sont les mêmes que pour les essais d'acide phosphorique (QUÉMÉNER, 1968). Les apports de solutions nutritives également, mais par des volumes moitié moindres de chacune des solutions $B_1$ et $B_2$.

TABLEAU 5

*Comparaison des résultats obtenus en hall de végétation et en milieu entièrement artificiel*

| Terre | | Aspach | | Champfleury | | Guewenheim | | Beaucouze $K_2$ | | Manosque | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Milieu | Hall | Artificiel | Hall | Artificiel | Hall | Artificiel | Hall | Artificiel | Hall | Artificiel |
| Extraction en 10 jours | K en p.p.m. de sol . | 31 | 44 | 15 | 37 | 126 | 165 | 87 | 118 | 141 | 296 |
| | En % K échangeable | 36 | 52 | 20 | 50 | 91 | 120 | 70 | 94 | 53 | 112 |
| Extraction en 20 jours | K en p.p.m. de sol . | 78 | 67 | 78 | 85 | 402 | 394 | 173 | 173 | 376 | 371 |
| | En % K échangeable | 92 | 79 | 105 | 115 | 291 | 286 | 138 | 138 | 142 | 140 |

### 4. 2. — *Préparation des sols*

150 g de sable de Biot lavé à l'acide chlorhydrique, rincé et séché, sont mélangés à 50 g de terre, préalablement séchée à la température du laboratoire et passée au tamis de 2 mm, c'est-à-dire conditionnée comme pour une analyse chimique courante.

Le mélange est arrosé, avant d'être placé sous les racines, avec une quantité d'eau correspondant aux deux tiers de la saturation du mélange de sol et de sable.

### 4. 3. — *Contact sol-plante*

Les mélanges sol-sable, pour lesquels nous emploierons désormais le terme de « semelle », sont placés sous les plantes le 10e jour suivant la levée,c'est-à-dire 2 semaines exactement après le début de l'essai. Le contact est maintenu pendant 20 jours, au cours desquels des apports de 10 ml de chacune des solutions $B_1$ et $B_2$ sont effectués les 1er, 3e, 5e, 7e, 11e, 15e et 17e jours, après le transfert. Tous les jours, l'eau évapotranspirée est remplacée (rétablissement de la tare initiale par de l'eau permutée). En fin d'essai, il est souvent nécessaire d'augmenter la tare d'arrosage de 20 à 40 g, pour tenir compte de l'augmentation du poids des végétaux.

### 4. 4. — *Récolte*

Le 20e jour après la mise en contact, les parties aériennes des plantules sont récoltées au moyen de ciseaux s'appuyant sur une réglette en PVC reposant elle-même sur les bords du pot, de manière à avoir une hauteur de coupe aussi constante que possible.

Les doubles pots sont retournés. Le pot avec fond peut alors facilement être soulevé, mettant à nu la semelle posée sur le pot sans fond et rendue très cohérente par l'humidité et les racines qui la pénètrent. A l'aide d'un fort couteau, la séparation de cette semelle du pot sans fond est très aisée.

Après séchage, les semelles sont débarrassées des racines et le potassium échangeable peut être déterminé sur le mélange sable + terre.

On peut ainsi calculer la variation du potassium échangeable du sol consécutive au prélèvement de potassium trouvé dans les parties aériennes des plantules placées en contact avec le sol étudié, en tenant compte de celui présent dans des plantules placées sur une semelle de sable pur.

## V. — DISCUSSION

### 5. 1. — *Erreur systématique sur la quantité de potassium extrait*

Le mode de calcul du potassium prélevé par les plantes donné au paragraphe précédent néglige évidemment toute différence de développement et de composition radiculaires entre plantes complètement carencées et plantes mises en présence d'un sol. Si l'on se reporte à la figure 1, le prélèvement de potassium défini d'après l'analyse des plantes entières ne serait supérieur au précédent que de 4 p. 100 ; l'erreur commise serait donc faible, mais ce graphique a été obtenu pour une durée de l'essai beaucoup plus courte que celle retenue en définitive. Même si, pour des raisons d'ordre pratique, il est impensable de procéder à la récolte systématique des racines, il est bon d'avoir une idée de l'ordre de grandeur de l'erreur commise.

Pour des terres cédant en 20 jours jusqu'à 500 p.p.m. de K, nous avons pu vérifier que la récupération des racines (et débris de graines) contenues dans le sable du pot supérieur permet une estimation du prélèvement supérieure de 6 à 8 p. 100 à la précédente. Il est plus difficile de savoir ce que représente le potassium des

racines développées dans le mélange sable + terre. Pour celles-ci, nous avons envisagé deux méthodes de séparation :

— ou bien lavage des semelles à grande eau, au-dessus d'un tamis : ceci a comme inconvénients de détruire, sauf nouvelle complication, l'échantillon de sol après culture, et probablement d'entraîner une partie du potassium contenu dans les racines ;

— ou séparation des racines après séchage du sol, à l'aide d'une pince brucelle et d'un pinceau souple, les racines récupérées pouvant être lavées ensuite.

Cette deuxième méthode nous a donné des poids de racines plus faibles que la première : il nous a d'abord semblé normal qu'elle occasionnât des pertes plus grandes. Nous avons vérifié que le lavage des racines extraites à sec faisait baisser leur teneur en potassium.

D'autre part, la dispersion des résultats était moins grande par la méthode à sec que par lavage direct. Plus curieusement, les échantillons prélevés sans aucun lavage avaient très souvent des teneurs en K plus faibles que les racines prélevées par la première méthode.

Tout ceci ne permet qu'une conclusion : il est bien difficile d'obtenir un échantillon de racines représentatif dans ce type de culture, où le peuplement très dense et la petitesse du récipient aboutissent, après 5 semaines de culture à un enchevêtrement de racines d'autant plus dense et difficile à laver que le sol est plus riche en K et en argile.

Dans ces conditions, nous obtenons, en estimant le potassium prélevé à partir des analyses de la totalité des plantules récupérées, un supplément moyen, par rapport à la méthode indiquée en 44, remarquablement constant en valeur relative : 10 à 13 p. 100.

Cette différence n'est certes pas négligeable. Mais l'erreur relative étant pratiquement constante n'a pas d'importance lorsqu'il s'agit de comparer les disponibilités des divers sols. Elle en a beaucoup plus lorsqu'il s'agit d'établir des bilans des diverses catégories de potassium du sol, total, échangeable et non échangeable. Le bilan de K total étant estimé par défaut, celui de K non échangeable le sera également et ainsi, pour certains sols à faible pouvoir de libération, apparaîtront des fixations de potassium au cours de la culture qui peuvent n'être que des artefacts et feront penser que le potassium de ces sols avant culture n'était pas en équilibre.

### 5. 2. — *Variation de la quantité de matière végétale récoltée*

L'un des avantages de la méthode de STANFORD et DE MENT résidait dans l'invariance de la matière végétale produite, la courte durée de la culture ne permettant pas aux différences de nutrition minérale d'agir sur la croissance. Comme nous avons allongé la durée de la culture et apporté des éléments nutritifs après le transfert, cet avantage se trouve nettement diminué : les poids récoltés dans les témoins (sable pur) sont de l'ordre de 2 g de matière sèche. En présence de sols, on obtient, par exemple, 2 300 mg pour une extraction de 150 p.p.m. de K environ et le poids de matière sèche peut monter à 3 g pour les extractions les plus fortes que nous ayons obtenues, de l'ordre de 800 à 1 000 p.p.m. Cette différence entre la carence totale et les sols les plus riches nous semble encore tolérable.

### 5. 3. — *Possibilité d'améliorer la faculté d'extraction*

Une augmentation des quantités d'éléments nutritifs autres que K fournis à la plante pendant la période de contact plante-sol provoquerait probablement une différenciation encore plus forte de la production végétale. Aussi n'avons-nous pas cherché une plus grande intensification de la culture. Pourtant l'analyse des plantules révèle une alimentation azotée plutôt faible : la teneur en azote des parties aériennes, seules récoltées de façon systématique, est d'environ 4 p. 100 dans les témoins. Elle tombe à moins de 3 p. 100 des plantules ayant extrait du sol 500 p.p.m. de K. Les apports de solution nutritive fournissant 90 mg d'azote et les graines 25 mg, l'analyse des plantules entières montre qu'elles renferment 85 mg environ. Pour de l'orge de cet âge, l'alimentation azotée est loin d'être surabondante.

En admettant le couplage de l'absorption des cations avec celle des anions, l'absorption de K est probablement liée ici, autant qu'à l'absorption des ions nitriques, à celle des ions phosphate et sulfate fournis en quantité relativement beaucoup plus abondante, mais dont la vitesse d'absorption est plus faible.

Tout ceci suggère en définitive l'idée d'introduire dans la solution nutritive un anion qui serait absorbé aussi rapidement que les ions nitriques, et qui aurait moins d'effet sur la production végétale : en particulier, on pourrait employer l'ion Cl qui, de plus, est bien toléré par l'orge. Mais ceci n'a pas encore pu être étudié.

### 5. 4. — *Conditionnement des sols avant culture*

La quasi-totalité de nos essais a été effectuée sur des sols échantillonnés pour les analyses usuelles, et de ce fait séchés à la température du laboratoire puis tamisés sur la passoire de 2 mm.

Il est évident que, dans une culture aussi miniaturisée, on ne peut travailler sur des sols bruts, non débarrassés de leurs éléments grossiers. Par contre, le séchage des sols risque d'avoir des effets mal prévisibles, en particulier dans le cas de sols récemment fertilisés, où il entraîne des fixations de potassium échangeable d'importance variable avec les sols.

Cet inconvénient n'est pas propre à la méthode de STANFORD et DE MENT mais il se trouve, pour elle, accru par le fait que, dans un délai aussi court, il n'est pas sûr que les phénomènes provoqués par le séchage soient totalement réversibles. L'inconvénient est probablement moins important pour une culture type CHAMINADE dont la durée atteint ou dépasse 6 mois.

Devant les difficultés d'ordre pratique de faire fonctionner une chaîne de microcultures travaillant sur des sols conservés dans l'état du moment du prélèvement, nous avons cherché à estimer le risque d'erreur dû au séchage des sols, en effectuant quelques séries de comparaison : sols non séchés-sols séchés, puis réhumectés pour la mise en culture.

Dans de nombreux cas, nous n'avons observé que des différences minimes pouvant être dues aux erreurs d'expérience. Mais, sur quelques prélèvements effectués en Normandie, nous avons obtenu les résultats mentionnés dans le tableau 6.

Ici, les différences paraîssent vraiment très importantes. Sans vouloir en dis-

cuter ici les causes possibles, nous nous bornerons à signaler ce risque d'artefact très important, probablement pas très fréquent. Ici d'ailleurs, le phénomène pouvait être soupçonné, car il s'accompagnait d'un phénomène de même sens pour le potassium échangeable.

TABLEAU 6

*Exemple d'artefacts liés au conditionnement des sols*
*Sols de Normandie* (couche de 0 à 10 cm)

| Prélèvements effectués à : | K extrait (p.p.m. de sol) Extraction faite sur sol : | |
|---|---|---|
| | Non séché | Séché puis réhumecté au moment de la culture |
| Les Loges s/Drecey (50) ..... | 14 | 50 |
| Hotot-en-Auge (14)..... | 48 | 199 |
| Le Pin-au-Haras (61) { Pièce 1 .. | 72 | 98 |
| Le Pin-au-Haras (61) { Pièce 2 .. | 127 | 234 |
| Saint-Martin-d'Osmonville (76) ... | 65 | 188 |

## VI. — PERFORMANCES OBTENUES AVEC LA VARIANTE PROPOSÉE

### 6. 1. — *Dispersion et reproductibilité*

Les écarts entre répétitions effectuées sur un même sol — généralement quatre — paraissent être essentiellement fonction de la nature des sols étudiés. Il est donc difficile de parler de la dispersion due à la méthode. Pour prendre deux exemples extrêmes, nous avons pu extraire 800 p.p.m. de K de certains sols sur argiles du Keuper, de Moselle, avec des écarts par rapport à la moyenne ne dépassant pas 20 p.p.m., soit $\pm$ 2,5 p. 100. A l'opposé, avec les sols développés sur roches cristallines ou éruptives, et parmi eux particulièrement ceux pour lesquels le rapport K absorbé/K échangeable avant culture est très élevé (de l'ordre de 4 ou 5), la dispersion des résultats est toujours très forte et les écarts peuvent atteindre $\pm$ 25 p. 100 de la moyenne pour des absorptions du même ordre de grandeur qu'avec les sols mosellans précédemment cités : les écarts absolus sont alors énormes. En rapprochant ces résultats des dispersions également très élevées obtenues, pour le phosphate cette fois dans les essais de granulés (QUÉMÉNER, 1968), nous sommes amenés à penser qu'il y aurait dans ce type de sols cession de potasse à l'orge par des particules relativement grosses, de répartition capricieuse à l'intérieur des récipients de culture. Mais ceci n'est qu'une hypothèse.

Parmi les facteurs de variation des résultats d'une série à l'autre, il faut mettre l'origine des graines d'orge utilisées. Le tableau 7 montre les résultats d'un essai effectué avec 9 lots de graines d'orge *Rika* échantillonnés sur les 9 traitements d'un essai azote $\times$ potasse de la station d'Aspach, plus un lot de graines provenant de la ferme de Schœnensteinbach. Les quantités de potassium extraites des trois sols utilisés varient avec le lot de graines, et de plus, les écarts entre les sols sont différents. La dispersion exprimée ici sous la forme de la plus petite différence signi-

ficative calculée pour chaque lot, varie également dans des proportions considérables. Il y aurait probablement intérêt à utiliser pour ce genre de cultures des semences plus homogènes.

De toute façon, pour pouvoir en toute rigueur comparer les résultats obtenus sur une assez longue période, il faudra constituer à l'avance un lot de graines suffisamment important, mais dont il n'est malheureusement pas exclu que les propriétés puissent varier au cours de la conservation.

TABLEAU 7

*Influence des semences sur l'extraction du potassium*

| Semences d'orge *Rika* provenant de : | K apporté par les graines (en mg/pot) | K des parties aériennes du témoin sans K (mg/pot) | K extrait p.p.m. de sol | | P.p.d.s. P = 0,05 (p.p.m.) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Aspach | Manosque | |
| Essai d'Aspach N × K parcelles : | | | | | |
| $N_1K_0$ | 6,61 | 5,51 | 134 | 416 | 7,4 |
| $N_2K_0$ | 6,43 | 5,23 | 129 | 378 | 35,5 |
| $N_3K_0$ | 5,88 | 5,02 | 114 | 340 | 43,2 |
| $N_1K_1$ | 6,51 | 5,64 | 133 | 343 | 20,3 |
| $N_2K_1$ | 6,39 | 5,64 | 154 | 357 | 23,5 |
| $N_3K_1$ | 6,19 | 5,32 | 114 | 385 | 104,7 |
| $N_1K_2$ | 6,56 | 5,58 | 151 | 417 | 26,3 |
| $N_2K_2$ | 6,00 | 5,40 | 136 | 416 | 46,6 |
| $N_3K_2$ | 6,14 | 5,61 | 140 | 373 | 33,7 |
| Ferme des M.D.P.A. Schoenensteinbach | 6,19 | 4,47 | 176 | 376 | 35,5 |

Malgré cette réserve, la reproductibilité des résultats, sans être excellente, comme la dispersion, dépend du type du ou des sols introduits dans chaque série comme référence. Au début, nous nous sommes contentés du sol d'Aspach dont nous disposons, évidemment, de réserves inépuisables. Ce sol donne des absorptions moyennes de l'ordre de 140 p.p.m., avec une dispersion assez forte, généralement supérieure à 10 p. 100. Rapidement le besoin se fait sentir d'un étalon plus riche ; nous avons utilisé le sol de Manosque (tabl. 1) qui donne des résultats assez serrés. Sur cinq séries d'essais, réalisées avec deux lots de graines différents malheureusement, nous avons obtenu les résultats suivants (absorptions en p.p.m.) :

— Aspach 125, 118, 154-157, 134. Moyenne 138, écart maximal 20 p.p.m., soit 14,4 p. 100.

— Manosque 362, 372, 357-386, 377. Moyenne 370, écart maximal 17 p.p.m., soit 4,5 p. 100.

Finalement, dans les conditions dans lesquelles nous travaillons, les écarts entre essais peuvent aller jusqu'à 40 p.p.m., ce qui, rappelons-le, correspond à une variation de 2 mg de K exporté par pot.

6. 2. — *Extractions maximales à partir de sols avec ou sans apport d'engrais Comparaison avec d'autres types de cultures en pots*

Le potassium extrait de sols auxquels n'a pas été ajouté d'engrais potassique au moment même de nos essais a pu atteindre des quantités correspondant à 1 p. 1 000 du poids de sol. Bien qu'en général, les quantités extraites soient en corrélation avec le potassium échangeable de ces sols, la liaison est lâche, et le rapport K extrait/K

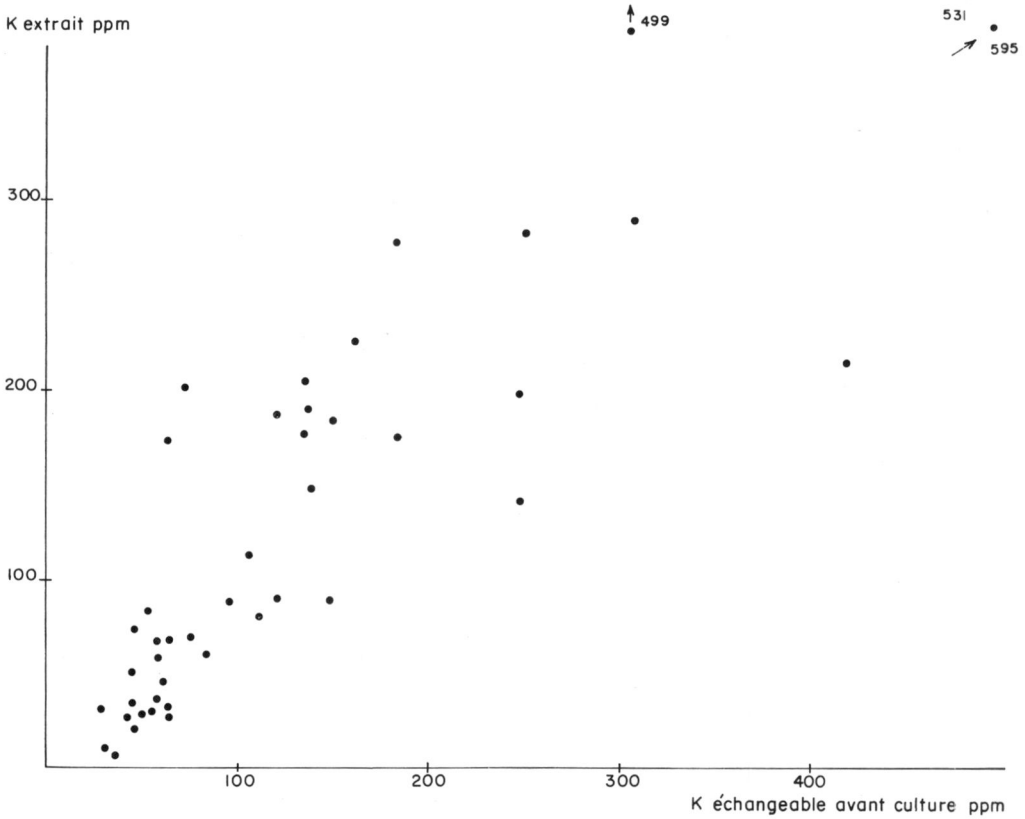



FIG. 4. — *K échangeable et K extrait pour un ensemble de sols divers*

échangeable avant culture peut varier, dans les cas extrêmes, de valeurs presque nulles à 6 ou 7. Le rapport de K absorbé à la diminution de K échangeable au cours de l'extraction est également très variable suivant les sols. Les figures 4 et 5 donnent une illustration de ces deux types de relation, qui pourront être utilisés pour le diagnostic de fertilité.

Malgré l'augmentation du temps du contact plante-sol, la technique adoptée ne peut sans doute pas prétendre extraire autant de potassium des sols que des cultures en pots de durée plus longue. Pourtant, la figure 6 montre une excellente correspondance entre les extractions obtenues avec notre adaptation de la technique STANFORD et celles fournies par une culture voisine de celle décrite par CHAMINADE (1960) pour un ensemble de sols quelconques, mais conditionnés de la même façon

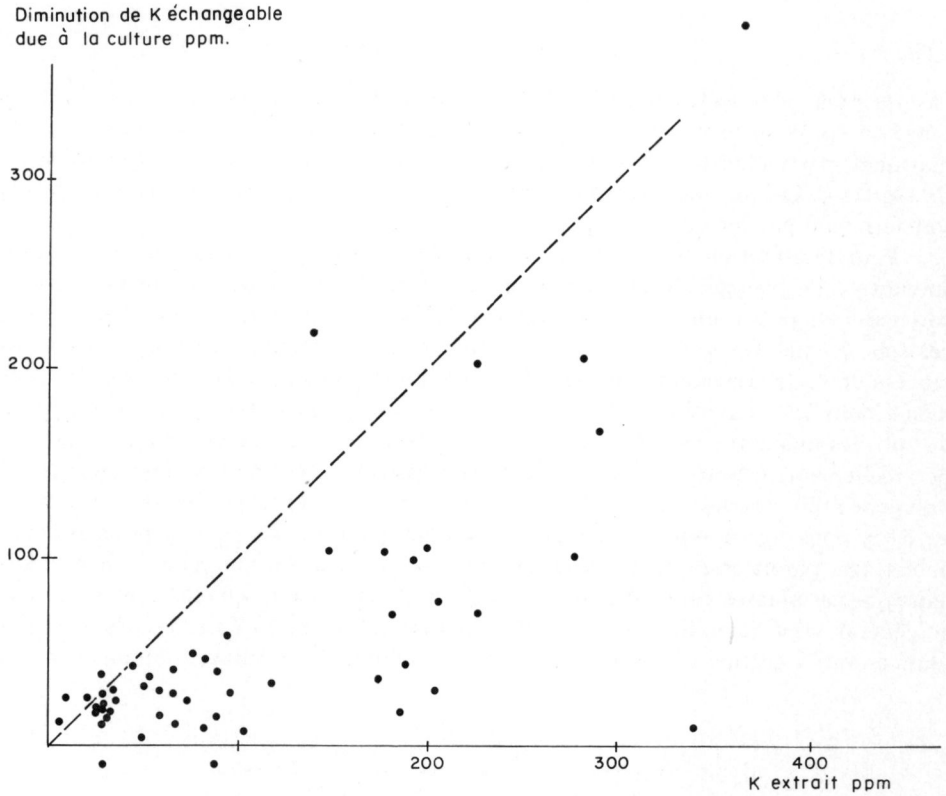



FIG. 5. — *Incidence du prélèvement de potassium par la microculture sur le potassium échangeable des sols de la figure 4*

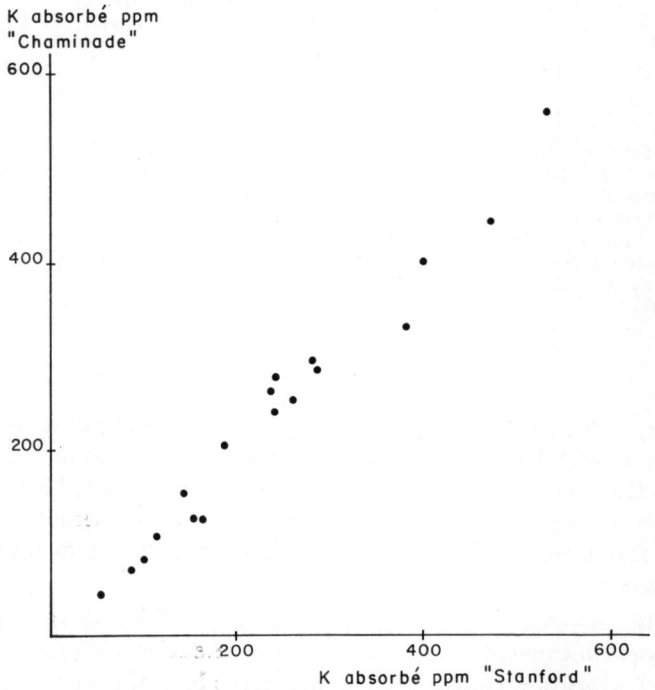



FIG. 6. — *Comparaison des quantités de K extraites dans quelques sols par la variante proposée et la technique de* CHAMINADE

(séchés puis réhumectés pour la culture). Du reste, la quasi-égalité des résultats que l'on constate ici n'est sans doute qu'une coïncidence, liée aux conditions climatiques particulières d'exécution de cette série de cultures de ray-grass selon CHAMINADE. Ce qui nous paraît important, c'est plutôt que le classement des sols soit le même par les deux techniques.

Pour l'extraction du potassium des sols très riches, on peut faire l'objection suivante : le principe de la technique étant d'utiliser des plantes préalablement carencées en potassium, la différenciation des sols riches serait mauvaise, car sur ces sols, les plantes s'enrichiraient rapidement en potassium, cesseraient d'être carencées et se trouveraient ainsi handicapées pour poursuivre l'extraction. En fait, même pour les extractions maximales mentionnées plus haut (1 p. 1 000 du poids du sol), les quantités réelles portent sur 50 g de sol, ce qui correspond à 50 mg par pot réellement extraits. En y ajoutant le potassium présent dans les témoins, et provenant de graines (de l'ordre de 6 à 7 mg), les poids de récolte oscillant de 2,5 à 3 g, nous voyons que les teneurs ne dépassent guère 2 p. 100, ce qui, pour de l'orge de cet âge, paraît être encore assez loin de la saturation. Ce qui montre bien d'ailleurs que ces plantes peuvent absorber bien plus de potassium qu'elles n'en extraient en général, c'est la facilité avec laquelle le potassium introduit dans les sols quelques jours avant la culture est absorbé : le tableau 8 donne les résultats obtenus sur une

TABLEAU 8

*Absorption comparée du potassium du sol et des engrais*

| Sol | Ko sans engrais | Plus 1 000 p.p.m. $K_2O$ | K apporté moins K absorbé (p.p.m.) |
|---|---|---|---|
| | K absorbé (p.p.m.) | K absorbé (p.p.m.) | |
| Boulbène de Sainte-Marthe (47) . | 40 | 680 | + 153 |
| Arène granitique (66) ..... | 91 | 767 | + 66 |
| Terrefort d'Avignonet (32) ..... | 127 | 673 | + 160 |
| « Crayot » du Barrois (10) ..... | 154 | 829 | + 4 |
| Limon de Vallée du Barrois (10). | 166 | 813 | + 20 |
| « Woëvre » du Barrois (10) ..... | 210 | 792 | + 31 |
| Terrefort de Levignac (47) ..... | 246 | 888 | — 55 |
| « Herbue » du Barrois (10) ..... | 270 | 1 014 | — 181 |
| Sableux alluvial (66) ..... | 493 | 1 141 | — 308 |

série de 9 sols — dont les caractéristiques ont été indiquées dans le tableau 1 — non fertilisés (Ko) ou enrichis (K 1 000) d'une quantité de potassium correspondant à 1 p. 1 000 de $K_2O$ dix jours avant d'être placés sous les plantes. Le bilan K apporté — K absorbé est négatif dans 3 sols sur neuf et voisin de zéro dans trois autres.

Cette facilité avec laquelle le potassium introduit est absorbé appelle du reste deux remarques :

— l'étude des phénomènes survenant au cours de l'enrichissement des sols en potassium, particulièrement importante pour différencier les types de sol (BLANCHET et BOSC, 1967), ne pourra guère se faire avec le mode opératoire utilisé pour

sonder les réserves du sol qu'en ayant recours à des apports de $K_2O$ dépassant largement 1 p. 1 000 du poids de sol ;

— cette facilité est peut-être en partie liée à la courte durée de la culture, jointe à la rapidité de l'exploration radiculaire, ce qui ne permettrait pas à certains phénomènes de fixation assez lents de se produire.

Rappelons que la technique proposée donne au contraire, pour l'étude des liaisons épuisement-libération de potassium, des résultats identiques à ceux d'autres techniques de cultures en pots, en particulier les cultures de ray-grass selon CHAMINADE (GARAUDEAUX et QUÉMÉNER, 1968).

L'intervention de ces fixations lentes est bien mise en évidence par les résultats de l'expérience suivante, réalisée sur deux échantillons provenant du domaine de l'I. N. R. A., au Pin-au-Haras. Ces échantillons ont été soumis à l'extraction par microculture, soit quelques jours après apport de 500 p.p.m. de $K_2O$ (temps court), soit 6 semaines après, pendant lesquelles les sols ont été maintenus à une température de 25° et à une humidité correspondant aux 2/3 de la saturation. La différence des résultats obtenus entre sol enrichi et non enrichi a été exprimée en p. 100 de la quantité ajoutée :

Temps court — sol 0-10 cm : 90,9 p. 100 ; sous-sol 10-20 cm : 68,1 p. 100.
Temps long — sol 0-10 cm : 84,7 p. 100 ; sous-sol 10-20 cm : 39,7 p. 100.

Ces résultats indiquent une évolution du potassium beaucoup plus marquée dans le sous-sol que dans le sol, et correspondent d'ailleurs à des différences importantes de composition (en particulier la teneur en argile passe de 15 p. 100 dans la couche 0-10 cm à 43 p. 100 dans la couche 10-20 cm).

Ils suggèrent une utilisation très facile de cette méthode pour étudier l'évolution du potassium des engrais dans les sols en fonction du temps et d'autres variables.

## VII. — AMÉLIORATIONS ENVISAGÉES

Actuellement, deux possibilités d'amélioration sont à l'étude à la Station d'Aspach. L'une, d'application occasionnelle, cherche à prolonger la durée de l'extraction. L'autre, d'intérêt pratique, cherche à simplifier le système d'alimentation en eau.

### 7. 1. — *Augmentation de la durée de l'extraction*

Elle paraîtrait souhaitable, dans divers cas, par exemple :

— pour voir si un sol serait capable, pendant un temps plus ou moins long, de continuer à fournir du potassium au même rythme que lors de la première extraction ;

— pour mieux juger des réserves d'un sol dont, au cours de l'extraction standardisée proposée, le potassium échangeable lui-même s'est montré d'assimilation difficile ;

— pour estimer si la perte de mobilité du potassium des engrais après contact avec le sol est définitive, ou si ce potassium peut être récupéré en davantage de temps, etc.

L'augmentation pure et simple de la durée de contact ne nous a pas paru souhaitable. Au fur et à mesure que les plantes grandissent, il devient de plus en plus malaisé de conduire les cultures dans des conditions climatiques bien standardisées. En particulier, il devient difficile d'éclairer correctement la masse végétale touffue formée par le rassemblement des petits pots serrés les uns contre les autres. Il serait nécessaire de les espacer, donc de consentir à perdre de la place. En outre, les besoins en eau des plantes s'accroissent et la petitesse des pots ne permet pas d'y loger des réserves suffisantes. Mais surtout, les différences de nutrition auraient encore plus d'influence sur le développement végétal et finiraient par rendre tout à fait superflue la période de carence préalable.

Comme au bout des 20 jours d'extraction, la séparation des « semelles » est très aisée, nous avons jugé plus conforme au principe de la méthode d'apporter à nouveau sur ces « semelles » un lot de plantules carencées et de procéder à une deuxième extraction. (*A priori*, rien n'interdit de continuer par une 3e, etc.)

Quelques résultats positifs ont été obtenus dans le cas de sols riches et même très riches (tabl. 9).

TABLEAU 9

*Quelques résultats obtenus avec deux extractions successives*
(K extrait p.p.m. de sol)

| Sol | 1re extraction | 2e extraction | Total |
|---|---|---|---|
| Sol de Corrèze sur gneiss, n° 1 | 1 158 | 416 | 1 674 |
| Sol de Corrèze sur gneiss, n° 2 | 246 | 30 | 276 |
| Sol de Corrèze sur Amphibolite, n° 1 | 736 | 272 | 1 008 |
| Sol de Corrèze sur Amphibolite, n° 2 | 632 | 158 | 790 |
| Sol de Corrèze sur Embrechites, leptynique | 147 | 70 | 217 |
| Sol de Moselle, sur Keuper | 983 | 120 | 1 103 |

### 7. 2. — *Simplification des arrosages*

Vers la fin de la culture, les pertes d'eau peuvent atteindre 70 g par jour et par pot. Les réserves totales en eau étant, dans ces petits récipients, de 110-120 g, l'alimentation en eau des plantes risque de devenir critique à certains moments de la journée. En outre, le sol peut subir des variations d'humidité dont on ne sait pas apprécier l'influence sur la cession de potassium.

Renouveler l'arrosage plusieurs fois par jour peut constituer un palliatif dans certains cas, pour un petit nombre de pots. Mais cette pratique ne peut être généralisée.

L'utilisation d'un système d'arrosage par mèche trempant dans une réserve d'eau nous a paru devoir à la fois résoudre le problème de la régularité de l'alimentation hydrique et diminuer les corvées d'arrosage. Une toile de nylon tapisse le fond du pot recevant le mélange sol + sable ; ses deux extrémités passent à travers ce fond par deux fentes et trempent dans l'eau contenue dans une boîte identique au pot de culture ; celui-ci est emboîté dans la réserve d'eau de la même façon que

le récipient sans fond est emboîté dans le pot recevant le sol ; on en arrive ainsi à une superposition de trois boîtes de même dimensions.

L'expérimentation de ce système n'en est qu'à ses débuts. Les quelques résultats reportés dans le tableau 10, obtenus sur des sols choisis pour leur texture différente, montrent que, dans l'ensemble, il donne des absorptions un peu plus faibles. La raison

TABLEAU 10

*Comparaison de deux systèmes d'alimentation en eau*
(K extrait p.p.m, moyenne et intervalle de confiance)

| Sol | Mode d'apport de l'eau : | |
|---|---|---|
| | habituel | par montée capillaire dans une mèche |
| Limon fin battant ..... | 135 ± 9,9 | 117 ± 10,9 |
| Limon ..... | 139 ± 22,6 | 64 ± 92,7 |
| Argileux ..... | 472 ± 102,2 | 430 ± 37,6 |
| Arène granitique ..... | 121 ± 27,0 | 97 ± 15,7 |

en est peut-être que les apports de solutions nutritives continuent à se faire par le haut du pot : les éléments nutritifs seraient ramenés à la surface par suite de l'évaporation ultérieure dans une zone à dessiccation rapide, de telle sorte qu'ils échapperaient en partie aux plantes. Quant à la dispersion, elle paraît ici, dans 3 cas sur 4, équivalente à celle du système précédent (ou même plus faible). Toutefois, l'exemple du sol 2 montre que des défaillances sont à craindre, par suite d'un mauvais amorçage, ou d'un désamorçage de la montée capillaire.

Les causes exactes de ces défaillances devront être examinées, et le système testé sur une plus large échelle avant que cette modification puisse être adoptée.

## CONCLUSION

Bien qu'il ait été nécessaire d'accroître la durée du contact plante-sol et de diluer ce dernier pour atteindre l'objectif que s'étaient fixé les auteurs (extraire en moyenne K échangeable sur un éventail de sols très divers), le système végétal utilisé paraît susceptible d'un emploi beaucoup plus souple pour l'extraction du potassium des sols que pour celle des phosphates. Pour s'en persuader, il n'est besoin que de rapprocher la facilité avec laquelle le potassium des engrais potassiques d'apport récent est absorbé, de l'effet souvent à peine significatif des apports d'engrais phosphatés (QUÉMÉNER, 1968). Bien que, dans ce dernier cas, la durée de contact ait été plus courte, l'écart reste très important.

Les possibilités d'extractions de 0 à 1 000 p.p.m. (et peut-être plus) permettent d'étudier une gamme très large de sols, tandis que la mesure du potassium échangeable avant et après culture doit permettre de mesurer la réaction du sol à la suite

de cette extraction de courte durée, mais très intense, ou plus exactement de définir une sorte de pouvoir tampon. La possibilité de procéder sur le même échantillon de sol à une deuxième extraction donnera, éventuellement, la signification du niveau de K échangeable après la première.

Le fait que le potassium des engrais d'apport récent est facilement utilisé permet l'emploi de la technique pour suivre la perte de mobilité de ce potassium avec le temps, ou sous l'influence de différents traitements, dans des sols différents.

Il reste à confronter les résultats obtenus avec la variante adoptée aux caractéristiques physico-chimiques et pédologiques des sols étudiés, et également à la réaction des sols à la fumure potassique dans la pratique. Le travail, déjà commencé, fera l'objet de notes ultérieures.

Ceci ne veut pas dire que la technique décrite ne soit pas susceptible d'amélioration. Climatisation, régularité de l'alimentation hydrique et qualité des semences paraissent être les trois postes sur lesquels un effort peut être fait.

Enfin, si un écart de 25 p. 100 à 30 p. 100 dans les productions de matière végétale nous a paru tolérable, eu égard aux résultats obtenus (passage de la carence totale aux sols cédant 1 p. 1 000 de K), il implique tout de même un renoncement au principe de base de la méthode (système végétal identique pour tous les cas étudiés). Il est possible qu'une modification de la solution nutritive, basée sur une limitation de la fourniture d'azote et un apport d'anions rapidement absorbés (Cl) diminue les variations du système végétal.

*Reçu pour publication en septembre 1970.*

## SUMMARY

### USE OF THE STANFORD-DE MENT METHOD OF EXTRACTING POTASSIUM FROM THE SOIL

The authors propose an adaptation of the Stanford-De Ment method, based on increasing the duration of plant-soil contact up to 20 days and the use of soil diluted by three times its own weight of sand (50 g of soil per pot), which, in the environmental conditions imposed, makes it possible to extract up to 1 000 p.p.m. of K. In these conditions, however, the plant material produced is no longer entirely independent of the richness of the substratum, in which a second extraction can be carried out with a fresh batch of deficient plants.

The scatter of the results appears to depend on the type of soil, as does also the reproducibility of results from one series to another, although this seems equally to be connected with the batch of seed used.

Potassium from recently applied fertilizer is easily absorbed and the method facilitates study of the breakdown of fertilizers, especially in relation to time, in different types of soil.

The authors suggest some new improvements that would repay study, particularly those concerned with the rhythm of water supply.

## ZUSAMMENFASSUNG

### ANWENDUNG DER STANFORD-DE MENT-TECHNIK ZUR EXTRAKTION DES KALIUMS AUS DEM BODEN

Die Verfasser schlagen eine Anpassung der Stanford-De Ment-Technik vor, die auf einer Verlängerung der Kontaktdauer Pflanze-Boden auf 20 Tage und auf der Benutzung von Böden, die mit drei Mal ihrem gewicht an Sand verdünnt werden (50 g Böden pro Topf), beruht. Diese

Technik gestattet, bei den angewandten Umweltbedingungen, eine Extraktion bis zu 1 000 p.p.m. (Teile pro Million) Kalium. Unter diesen Bedingungen ist jedoch der erzeugte Pflanzenstoff nicht mehr ganz unabhängig von der Reichhaltigkeit des Substrates, auf dem eine zweite Extraktion durch die weitere Zufuhr von Mangelpflanzen durchgeführt werden kann.

Die Streuung der Ergebnisse scheint vom Bodentyp abhängig zu sein. Dasselbe gilt für die Wiederholbarkeit von einer Serie zur anderen, wobei die Ergebnisse auch von den verwendeten Saaten abhängig zu sein scheinen.

Das Kalium der kürzlich zugebrachten Dünger wird ohne Schwierigkeit aufgenommen. Die Methode erlaubt die Untersuchung der Evolution der Dünger, besonders in Abhängigkeit von der Zeit, in den verschiedenen Bodentypen.

Die Verfasser empfehlen die Verfolgung der Versuche zwecks weiterer Verbesserungen, namentlich bezüglich des Rythmus der Wasserversorgung.

## РЕЗЮМЕ

*Применение метода Станфорда — де Мента при извлечении калия почв.*

Ж. КЕМЕНЕР, Д. РОЛЛАН.

Авторами предлагаются изменения метода Станфорда — де Мента заключающиеся в увеличении длительности контакта растение — почва до 20-ти дней, и применении почвы смешанной с тройным количеством песка (50 граммов почвы на сосуд). При этой системе и в условиях внешней среды данного опыта, возможно извлечь до 1 000 °/₀₀ калия. Но в этих условиях, полученный растительный материал, во многом зависит от степени богатства субстрата, который может также послужить для вторичной экстракции, и дать таким образом, новую партию недостаточно обеспеченной растительности.

Дисперсия результатов зависит как-будто от типа почвы также как и степень воспроизводительности разных серий, которая в свою очередь должна быть зависимой от качества использованных семян.

Калий из удобрений, недавно принесенных в почву, легко поглощается, что дает возможность изучать, при помощи этого метода, эволюцию удобрения в почвах различного типа, в частности, в зависимости от фактора — время.

Авторы предлагают изучить возможность новых усовершенствований этого метода, и в частности — ритмов водного питания растений.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Arnold R. W., Close B. M., 1961. Potassium-releasing power of soils from the Adgell rotation experiment assessed by glasshouse cropping. *J. Agric. Sci.*, **57**, 381-386.

Audidier L., Garaudeaux J., Chevalier H., 1962. Balance of exchangeable potassium and total potassium in various Soils. *Trans. Meet. Comm. IV and V, internation. Soil Sci.*, New Zealand.

Beckett P. R. T., 1964. Studies on Soil potassium. *J. Soil Sci.*, **15**, 1-23.

Blanchet R., Bosc M., 1967. Bilans de potassium et alimentation potassique des plantes en présence de rétrogradations et de libérations d'ions $K^+$ non échangeables. *Ann. agron.*, **18** (6), 601-621.

Chaminade R., 1960. Expérimentation en petits vases de végétation. *Ann. agron.*, **11**, 121-134.

Conyers E. S., Mac Lean E. O., 1969. Plant uptake and chemical extractions for evaluating Potassium release characteristics of soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **33**, 226-230.

De Ment J. D., Stanford G., Bradford B. N., 1959. A method for measuring short-term nutrient absorption by plants. II. Potassium. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **23**, 47-50.

Feigenbaum S., Hagin J., 1967. Evaluation of methods for determining available soil Potassium based on potassium uptake by plants. *J. Soil Sci.*, **18** (2), 197-203.

GARAUDEAUX J., QUEMENER J., 1968. Étude de la libération du potassium en cultures en pots. *Trans. 9 th Inter. Congress Soil Sci.*, vol. II, paper 67, 639-647.

QUÉMÉNER J., 1968. Exemples d'application de la Méthode de Stanford-De Ment à des problèmes de fertilisation phosphatée. *Ann. agron.*, **19** (5), 589-604.

ROLLAND D., 1962. *Essai d'applicalion de la technique Stanford et De Ment à la détermination de la potasse assimilable des sols, réalisé à la Station agronomique d'Aspach-le-Bas.* Mémoire de 3e année de l'Inst. techn. Pratique agric., Paris.

SALMON R. C., 1965. Release of non exchangeable potassium from some Rhodesia soils cropped with grass. *J. agric. Sci.*, **65**, 135-138.

SCHULTE E. E., COREY R. B., 1965. Extraction of Potassium from soils with sodium tetraphenylboron. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **29**, 33-35.

TALIBUDEEN O., DEY S. K., 1968. Potassium reserves in British soils. The Rothamsted classical experiment. *J. Agric. Camb.*, **71**, 95-104.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (6), 845-846.

# CHRONIQUE DES LIVRES

ELSEVIER'S DICTIONARY OF HORTICULTURE, in nine languages : English, French, Dutch, German, Danish, Swedish, Spanish, Italian, Latin, compiled under the auspices of the Ministry of Agriculture and Fisheries, The Hague, The Netherlands. — Amsterdam, Elsevier, 1970, 561 pages.

Ce dictionnaire fait suite au *Dictionnaire Horticole* en 8 langues publié en 1961 et qui était épuisé.

Le nombre de termes a été accru d'environ 40 p. 100 et atteint maintenant 4 240 ; l'italien a été ajouté comme neuvième langue et l'anglais a été choisi comme langue de base.

La table principale est donc en anglais ; les termes anglais sont classés alphabétiquement et suivis de leurs équivalents dans les huit autres langues. Des index par langues renvoient à la table principale.

Ce dictionnaire constitue un outil de travail indispensable pour tous ceux qui s'occupent d'horticulture sur une base internationale.

NUTRIENT MOBILITY IN SOILS : ACCUMULATION AND LOSSES. Proceedings of a symposium sponsored by the Soil Science Society of America, 1969, Detroit (Michigan). Madison, *Soil Sci. Soc. Amer.*, 1970, 81 p. (n° 4 in SSSA Special Publication Series).

Les communications de cette publication ont été présentées lors de la réunion annuelle de la Société américaine de Science du Sol en 1969.

Les objectifs de ce symposium étaient à la fois de donner des informations concernant les pertes et accumulations d'éléments nutritifs dans les sols, et de discuter des recherches nécessaires pour identifier les conditions dans lesquelles l'agriculture pourrait affecter la composition nutritive des eaux de surface.

Cinq communications sont présentées dans cet ouvrage :

| | |
|---|---|
| — THOMAS (G. W.). | Facteurs climatiques et agronomiques affectant la mobilité des éléments nutritifs. |
| — SIMONSON (R. W.). | Pertes en éléments nutritifs durant la formation des sols. |
| — STEWART (B. A.). | Revue des pratiques culturales en relation avec l'accumulation des nitrates. |
| — GARMAN (W. M.). | Bilan de la fertilisation. |
| — NELSON (L. B.). | Recherche nécessaire à l'étude de la relation : fertilisation des plantes-qualité de l'eau. |

WHITEHEAD (D. C.). — THE ROLE OF NITROGEN IN GRASSLAND PRODUCTIVITY. (A review of information from temperate regions). — Commonwealth Bureau of Pastures and Field Crops, Hurley, Bull., n° 48, 1970, 202 p.

Il est en général admis dans de nombreux pays que le potentiel d'accroissement de la productivité agricole est plus grand pour les prairies que pour les terres arables. Cependant uneap proche rationnelle, pour réaliser ce potentiel, doit être basée sur la compréhension des facteurs qui limitent la productivité des prairies.

Parmi ces facteurs, le rôle-clé joué par l'azote a fait l'objet de nombreuses recherches, en particulier au « Grassland Research Institute ». C'est pour cette raison qu'il a été demandé à l'auteur, en collaboration avec le Commonwealth Bureau of Pastures and Field Crops, de publier cet ouvrage qui constitue une synthèse des travaux importants dans ce domaine.

Ce travail est limité aux régions tempérées.

Trois thèmes sont traités :

*Part. I.* — La transformation de l'azote dans l'écosystème prairie, avec l'étude du cycle de l'azote, l'assimilation par les plantes, la fixation symbiotique et non symbiotique, l'accumulation d'azote dans la matière organique du sol, la consommation d'azote par les ruminants et le retour dans les excrétions d'animaux, les pertes par lessivages et dans l'atmosphère, l'équilibre azoté des prairies.

*Part. II.* — La réponse des graminées à l'application d'azote, influencée par des facteurs d'environnement et des facteurs culturaux.

*Part. III.* — L'effet des engrais azotés sur la composition et la qualité des prairies et sur la production animale.

L'ouvrage est complété par une liste des noms botaniques des espèces mentionnées dans le texte, une bibliographie comportant 516 références et un index-matières.

*Ann. agron.*, 1970, **21** (6), 847-850.

# TABLE DES MATIÈRES DE L'ANNÉE 1970

J.-P. ANDRÉ. — Étude expérimentale de la rétention par un sol calcaire, soumis à un lessivage intense, de doses massives de potassium ..... 211

J.-P. ANDRÉ. — Isothermes d'échange ionique sur les sols et réseaux de concentration ..... 703

Y. BARDIN. — Étude de la séparation, à l'aide des citrates, des orthophosphates calciques contenus dans les engrais ..... 95

S. BRUCKERT. — Influence des composés organiques solubles sur la pédogenèse en milieu acide.
I. — Études de terrain ..... 425
II. — Expériences de laboratoire, modalités d'action desagents complexants ..... 725

B. COCHARD, J.-P. DEFFONTAINES. — Essai de classement des terrains en Aunis pour leur utilisation agricole ..... 759

M. COPPENET. — Rappel chronologique des principaux travaux effectués en France (Numéro : Les oligo-éléments en France) ..... 469

M. COPPENET. — Exemples de problèmes régionaux. I. — Le Massif armoricain (Numéro : Les oligo-éléments en France) ..... 589

J. DECAU. — Effets comparés de l'irrigation et de la fumure azotée sur les productions qualitative et quantitative de Maïs de variétés différentes.
**I. — Rendements en grains** ..... 335

J. DELAS, A. DARTIGUES. — Exemples de problèmes régionaux. II. — Le Sud-Ouest (Numéro : Les oligo-éléments en France) ..... 605

Thérèse DUPUIS, P. JAMBU, J. DUPUIS. — Étude par analyse thermique différentielle des substances organiques extraites de sols hydromorphes calciques ..... 75

C. DUTHION, Ruth GROSMAN. — Potassium lentement libérable ; quelques essais de bilans culturaux ..... 57

P. DUTIL. — Exemples de problèmes régionaux. IV. — L'est du Bassin parisien (Numéro : Les oligo-éléments en France) ..... 631

L. DUVAL, J. MAURICE. — Le diagnostic des carences en oligo-éléments au moyen de l'analyse chimique des sols (Numéro : Les oligo-éléments en France) ..... 575

A. FAURE. — Contribution à l'étude de l'action d'un versoir sur le sol. II. — Comportement du sol travaillé par un versoir de charrue ..... 159

P. GOUNY, P. CORNILLON. — Exemples de problèmes régionaux. III. — Le Sud-Est (Numéro : Les oligo-éléments en France) ..... 619

Claire HUGUET. — Les oligo-éléments en arboriculture et en viticulture ..... 673

P. JACQUARD, G. MONNIER, L. CROISIER. — Étude des effets résiduels des cultures fourragères sur les cultures arables. II. — Effets résiduels de différents précédents sur des séquences de cultures arables ..... 5

P. JACQUARD, L. CROISIER. — Étude des effets résiduels des cultures fourragères sur les cultures arables. III. — Bilan de six années d'essais sur l'étude globale des effets résiduels et de leur durée ..... 247

P. JACQUARD, L. CROISIER, G. LEFÈVRE. — Étude des effets résiduels des cultures fourragères sur les cultures arables. IV. — Influence des modalités de retournement d'une prairie sur les performances d'un blé et d'un maïs.. 351

M. JAMAGNE, L. BLIET, J.-C. RÉMY. — Contribution à l'étude pédologique et agronomique des sols argileux du Bassin parisien. La Haute-Brie..... 119

C. JUSTE. — Actions toxiques des oligo-éléments (Numéro : Les oligo-éléments en France)..... 551

Élisabeth LEFEBVRE-DROUET. — Étude des variations de la composition minérale, protidique et glucidique des racines et des parties aériennes du dactyle (influence de la fertilisation potassique)..... 385

J.-R. MARTY, S. FIORAMONTI. — Comparaison de diverses rotations sur sol limoneux mal structuré ; effet améliorant des cultures fourragères..... 269

R. MOREL. — Propositions nouvelles relatives au problème de l'azote organique dans un sol en équilibre azoté..... 197

G. PÉDRO, A.-B. DELMAS. — Les principes géochimiques de la distribution des éléments-traces dans les sols (Numéro : Les oligo-éléments en France) . 483

Simone PÉRIGAUD. — Les carences en oligo-éléments chez les ruminants en France. Leur diagnostic. Les problèmes soulevés par l'intensification fourragère (Numéro : Les oligo-éléments en France)..... 637

J. RIVIÈRE, Y. FROUARD, G. CATROUX. — Influence d'enfouissements répétés de tiges de Maïs sur la microflore bactérienne des sols..... 403

M. ROBERT. — Étude expérimentale de la désagrégation du granite..... 777

A. TARDIEUX-ROCHE, P. TARDIEUX. — La biosynthèse des phosphates condensés par la microflore du sol et son rôle dans la nutrition des végétaux .. 305

S. TROCMÉ. — Influence de la fertilisation et de diverses techniques de culture sur l'alimentation des plantes en oligo-éléments (Numéro : Les oligo-éléments en France)..... 521

O.-P. VIMAL, E. JOLIVET. — Dégradation comparée d'un jeune Ray-grass enfoui dans un sol aéré ou dans un sol saturé d'eau..... 287

*Note technique.*

J. QUÉMÉNER, D. ROLLAND. — Application de la technique de STANFORD et DE MENT à l'extraction du potassium des sols..... 819

*Notes analytiques.*

Ph. GRAFFIN, G. MONNIER, C. JEANDET. — Comparaison de deux méthodes de dosage du carbone organique, appliquées à l'étude de la matière organique totale des sols ou de ses différentes fractions..... 315

P. MORARD, J.-L. GULLO. — Minéralisation des tissus végétaux en vue du dosage de P, K, Ca, Mg, Na..... 229

*Chronique des livres*..... 109, 325, 453, 845

*Information*..... 237

## CONTENTS

J.-P. ANDRÉ. — Experimental study of the retention of large amounts of potassium in a calcareous soil subjected to heavy leaching..... 211

J.-P. ANDRÉ. — Systems of ion exchange isotherms in the soil and their properties..... 703

Y. BARDIN. — Study of the separation, by means of citrates, of calcium orthophosphates contained in fertilizers..... 95

S. BRUCKERT. — The effect of soluble organic compounds on pedogenesis in an acid environment.
I. — Field studies ..... 425
II. — Laboratory experiments on the mode of action of the complex-forming agents ..... 725
B. COCHARD, J.-P. DEFFONTAINES. — An attempt to classify land in Aunis with reference to its agricultural value ..... 759
M. COPPENET. — Historical review of main work carried out in France..... 469
M. COPPENET. — Examples of regional deficiency. I. — The Armorican Massif (Trace elements in France) ..... 589
J. DECAU. — A comparison of the effects of irrigation and of nitrogen dressing on the qualitative and quantitative production of different varieties of Maize. I. — Grain yields ..... 335
J. DELAS, A. DARTIGUES. — Examples of regional problems. II. — South-West (Trace elements in France)..... 605
Thérèse DUPUIS, P. JAMBU, J. DUPUIS. — Investigation of organic substances extracted from hydromorphous calcic soils by differential thermal analysis ..... 75
C. DUTHION, Ruth GROSMAN. — Potassium that can be released slowly; experiments with cultivation levels ..... 57
P. DUTIL. — Examples of regional problems. IV. — The East of the Bassin parisien (Trace elements in France) ..... 631
L. DUVAL, J. MAURICE. — Diagnosis of trace elements deficiencies by means of chemical analysis of soils (Trace elements in France) ..... 575
A. FAURE. — Contribution to the study of the action of a plough mouldboard on the soil. II. — Behaviour of soil worked by a plough mouldboard ..... 159
P. GOUNY, P. CORNILLON. — Examples of regional problems. III. — The South-East (Trace elements in France)..... 619
Claire HUGUET. — Trace elements in the cultivation of trees and vines..... 673
P. JACQUARD, G. Monnier, L. CROISIER. — A study of the residual effects of fodder crops on arable crops. II. — The residual effects of various previous crops on sequences of arable crops ..... 5
P. JACQUARD, L. CROISIER. — A study of the residual effects of fodder crops on subsequent arable crops. III. — Results on six years of trials in a comprehensive study of the residual effects and of their duration ..... 247
P. JACQUARD, L. CROISIER, G. LEFÈVRE. — Study of the residual effects of fodder crops on arable cultures. IV. — Effects of different methods of pasture fallowing on the yields of a wheat and a maize ..... 351
M. JAMAGNE, L. BLIET, J.-C. RÉMY. — Contribution to the pedological and agronomic study of the clay soils of the Parisian Basin. The Haute-Brie .. 119
C. JUSTE. — Toxic effects of trace elements (Trace elements in France) .... 551
Élisabeth LEFEBVRE-DROUET. — Study of variations in the mineral, protein and sugar composition of the roots and aerial parts of dactylis (cocksfoot). (effects of potassium-containing fertilizer) ..... 385
J.-R. MARTY, S. FIORAMONTI. — Comparison of various rotations on silty, poorly-structured soil ; the improving effect of growing forage crops ..... 269
R. MOREL. — New proposals on the problem of organic nitrogen in a soil in nitrogen balance ..... 197
G. PÉDRO, A.-B. DELMAS. — Geochemical principles of the distribution of trace elements in soils (Trace elements in France)..... 483
Simone PÉRIGAUD. — Trace elements deficiencies of ruminants in France.

Diagnosis. Problems raised by intensive fodder-crop growing (Trace elements in France) ..... 637

J. RIVIÈRE, Y. FROUARD, G. CATROUX. — The effect of repeated ploughing in of maize stalks on the bacterial microflora of soils ..... 403

M. ROBERT. — Experimental study of granite disintegration ..... 777

A. TARDIEUX-ROCHE, P. TARDIEUX. — Biosynthesis of condensed phosphates by soil microflora and its part in plant nutrition ..... 305

S. TROCMÉ — Effects of fertilizers and of various methods of cultivation on the feeding of plants with trace elements (Trace elements in France) .. 521

O.-P. VIMAL, E. JOLIVET. — Comparison of the decomposition of Ray-grass seedlings labelled with $^{14}C$ in aerated and in water-saturated soils ..... 287

*Technical note.*

J. QUÉMÉNER, D. ROLLAND. — Use of the STANFORD DE MENT method of extracting potassium from the soil ..... 819

*Analytical notes.*

Ph. GRAFFIN, G. MONNIER, C. JEANDET. — A comparison of two methods of organic carbon quantitative analysis applied to the study of the total organic matter of the soil or of its various components ..... 315

P. MORARD, J.-L. GULLO. — Mineralization of plant tissues for the quantitative analysis of P, K, Ca, Mg, Na ..... 229

*Book reviews* ..... 109, 325, 453, 845

*Information* ..... 237

*Les Annales agronomiques figurent dans Current Contents.*

# RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

*Au début de chaque mémoire*, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

*Les mémoires* seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusions* f) *résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons...; h) *références bibliographiques.*

*Les travaux originaux en anglais* doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

*Pour les autres documents* (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

*Les références bibliographiques* doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

*Pour les articles :* le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

*Pour les ouvrages :* le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

*Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies*, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée et porter les numéros des figures.

*Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils* seront envoyés *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 16 × 24 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

*Photographies :* Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

*Correction des épreuves :* les auteurs recevront une épreuve a corriger.

*Envoi du manuscrit :* M. HÉNIN, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.